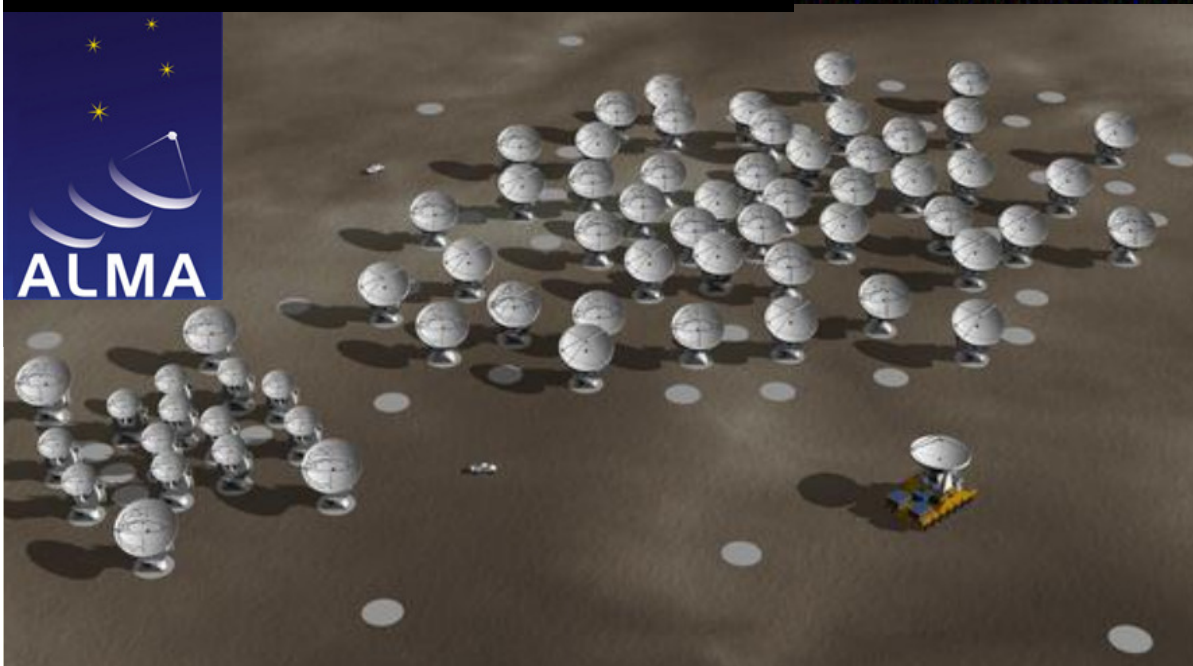
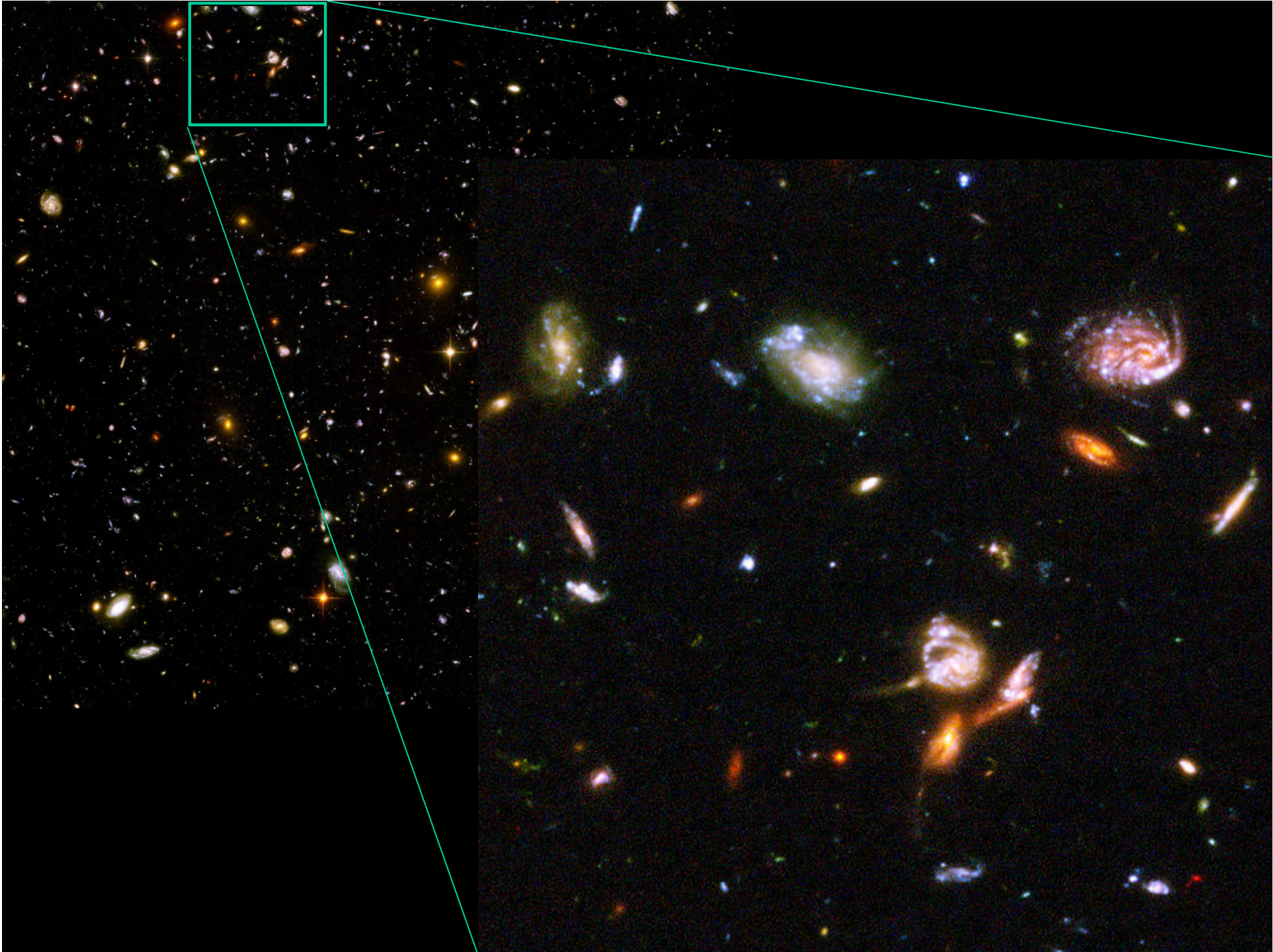


Les premières galaxies de l'Univers



Françoise Combes
Observatoire de Paris
2 Novembre 2012



Galaxies dans l'Univers jeune



Voir plus loin, et remonter
dans le temps

Aujourd'hui jusqu'à $z \sim 6$
(ou 95% de l'âge de l'Univers)

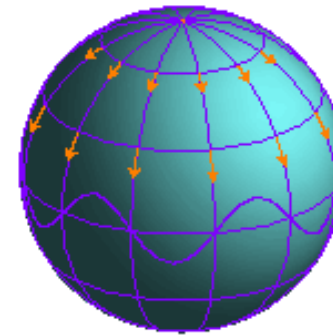
Galaxies plus nombreuses

Formation de plus
d'étoiles

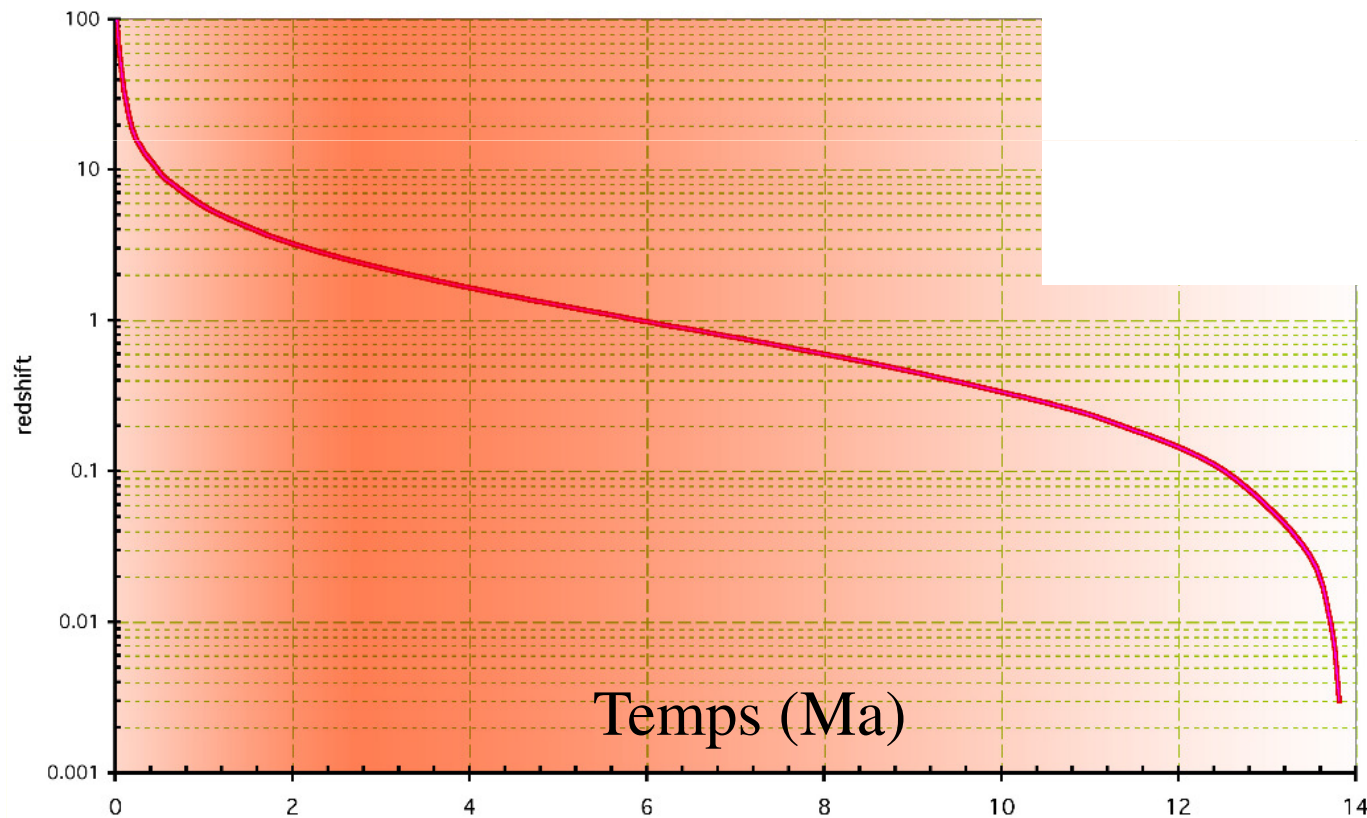
Noyaux plus actifs

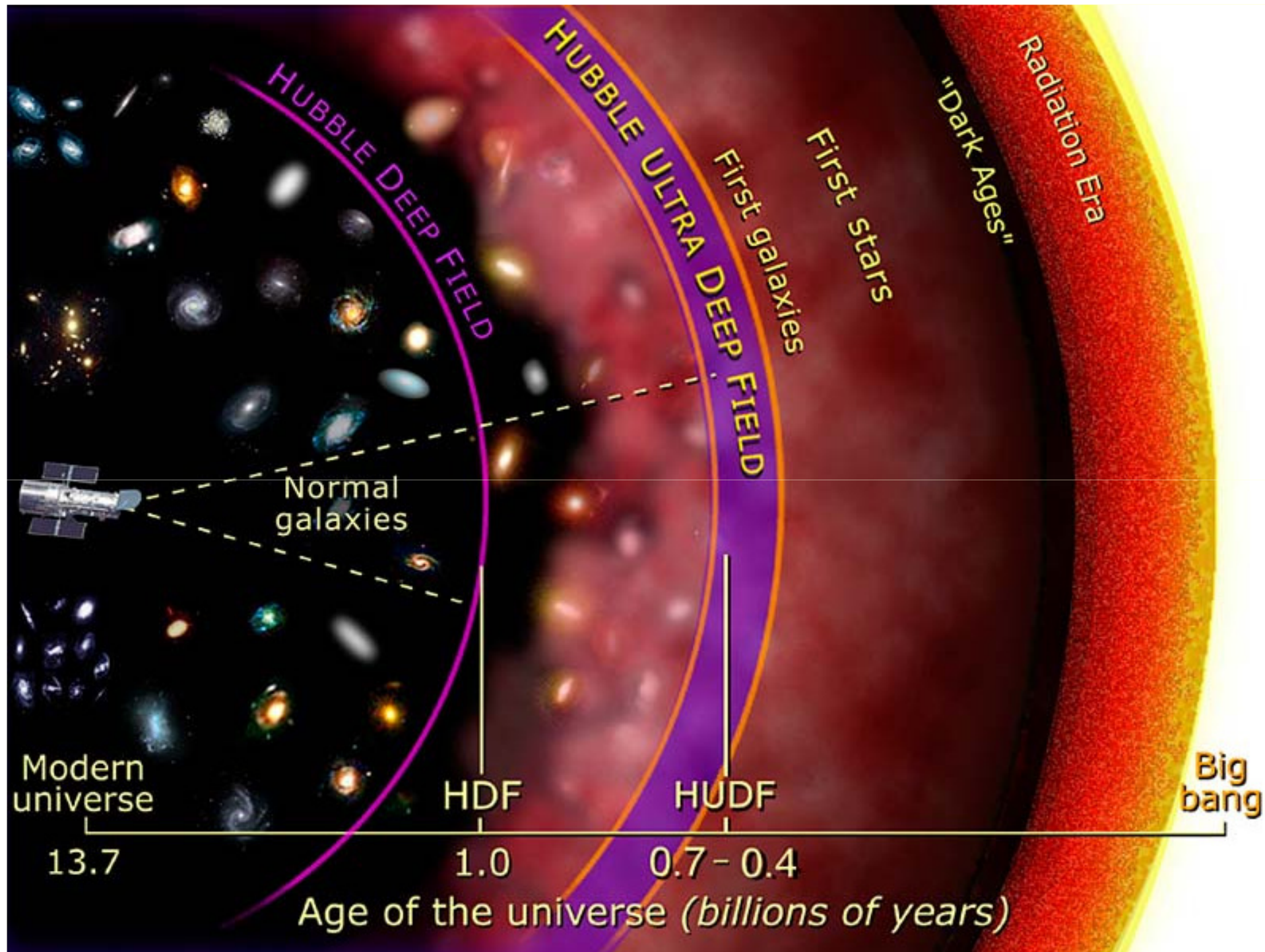


Expansion de l'Univers et décalage vers le rouge



« redshift » $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$





Premières galaxies:

Big-Bang

Recombinaison $3 \cdot 10^5$ an

Age Sombre

Comment se forment-elles?

1^{ères} étoiles, QSO $0.5 \cdot 10^9$ an

Réionisation de l'Univers

Renaissance Cosmique

Faible métallicité,

Fin de l'âge sombre

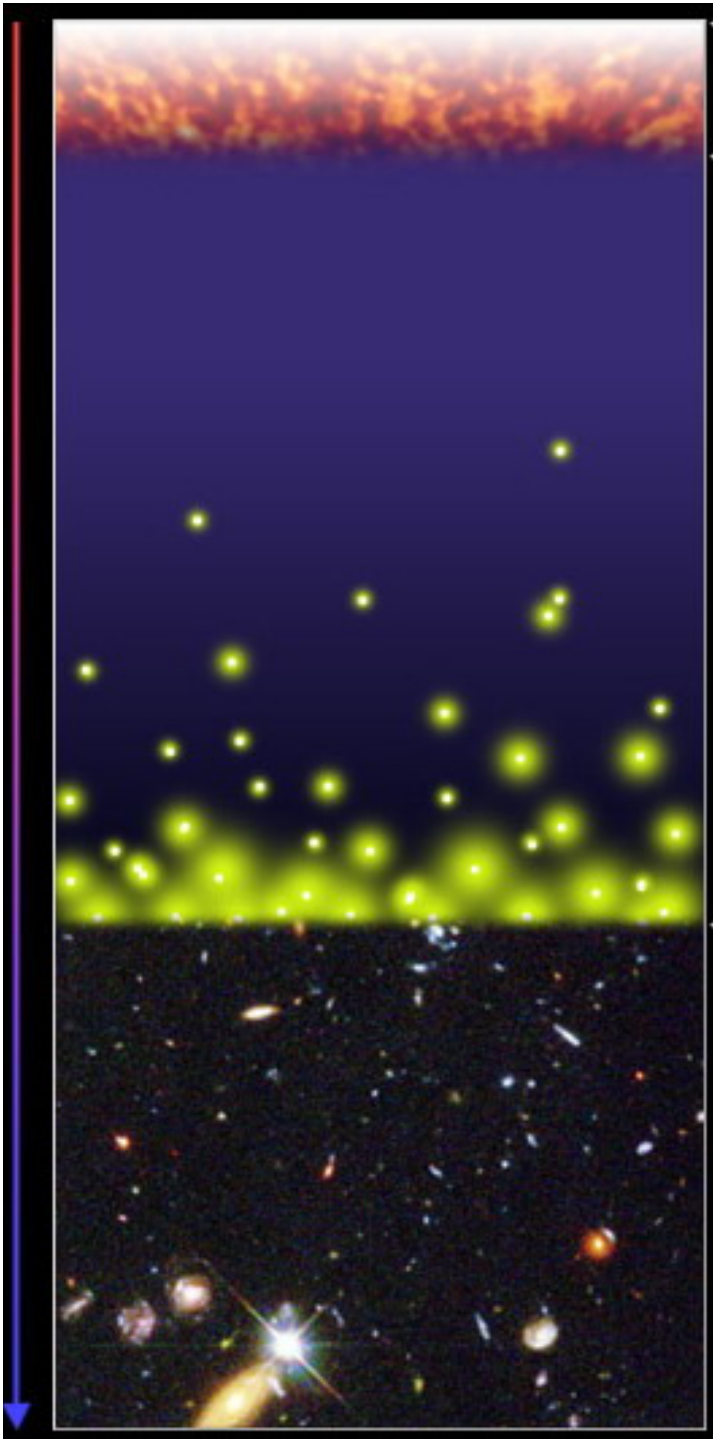
Fin de la reionisation 10^9 an

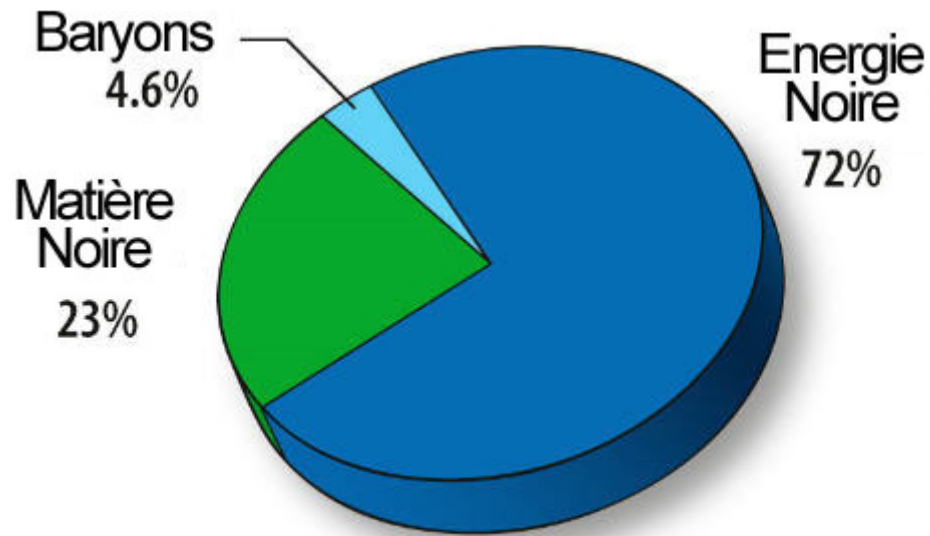
→ Étoiles différentes?

Evolution des Galaxies

Système solaire $9 \cdot 10^9$ an

Aujourd'hui $13.7 \cdot 10^9$ an





Résultats obtenus
grâce au
fond cosmologique
 $T \sim 3\text{K}$, vestige du Big-Bang

$$\Omega_m = 0.28$$

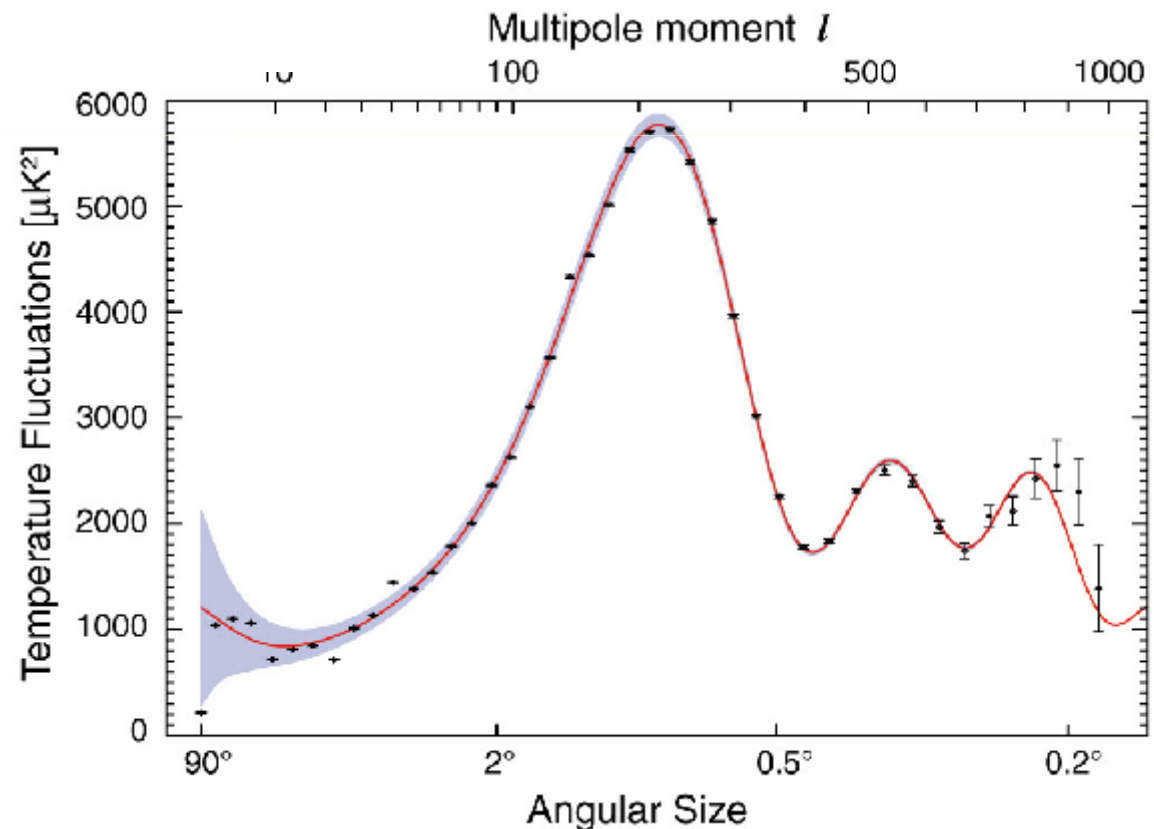
$$\Lambda = 0.72$$

$$\Omega_b = 0.05$$

$$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

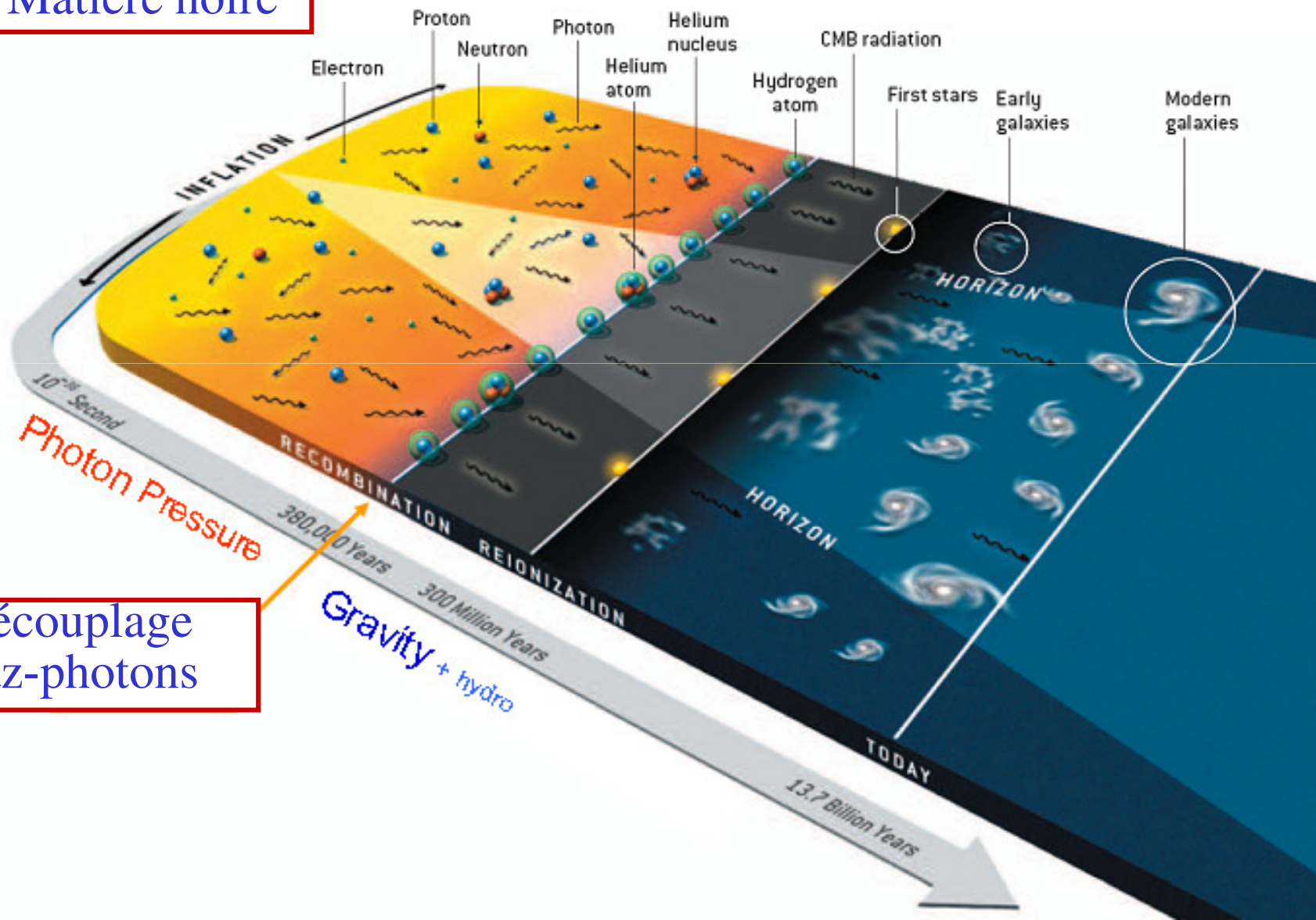
$$\text{Age} = 13.7 \text{ Gyr}$$

Univers plat



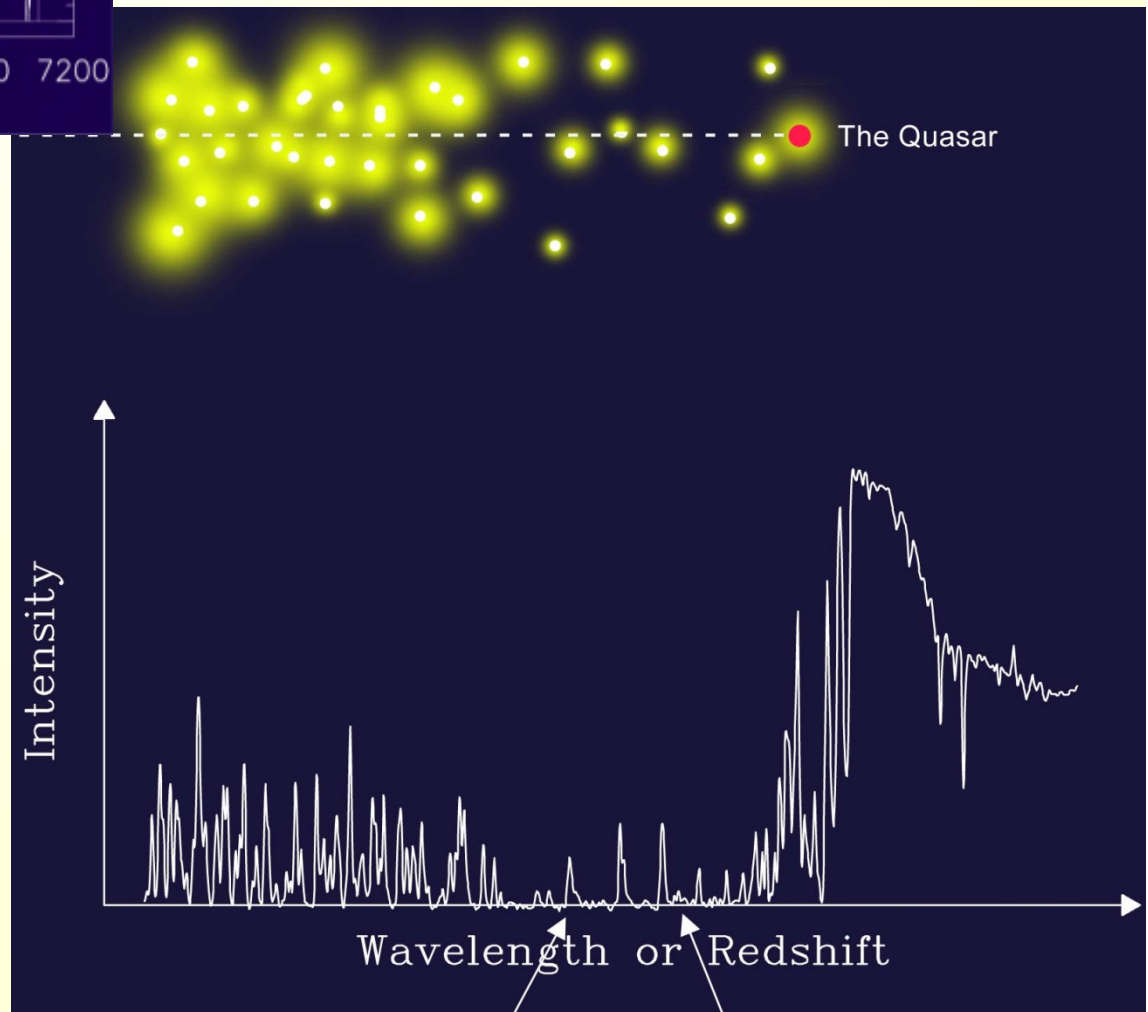
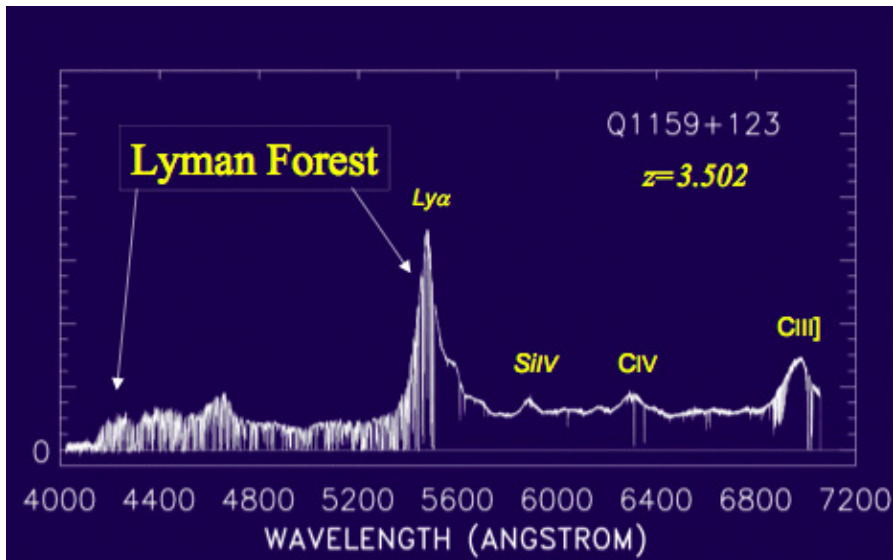
La matière noire s'effondre avant les baryons

Découplage Matière noire



Découplage gaz-photons

Mesure de l'âge sombre de l'univers

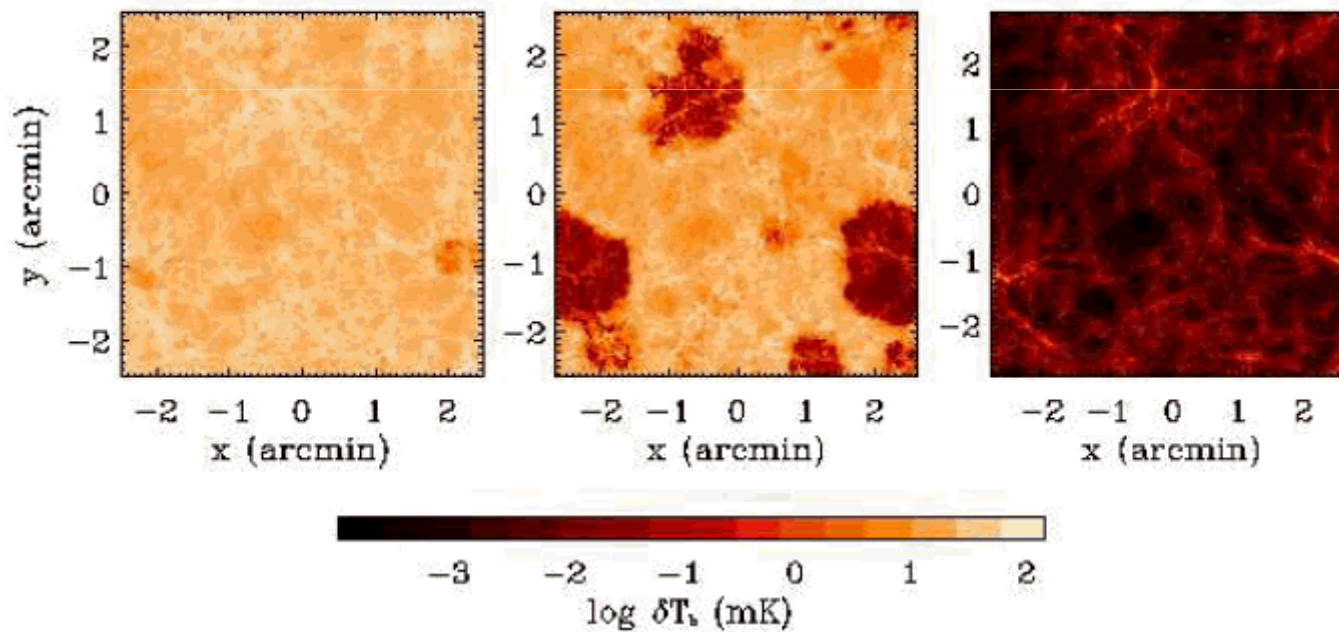
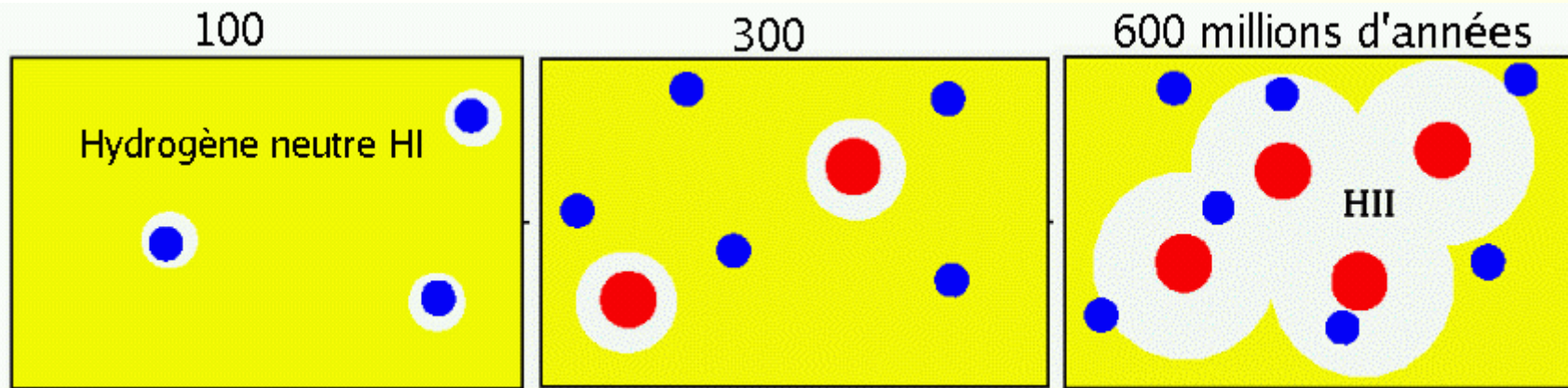


Ligne de visée
devant un quasar

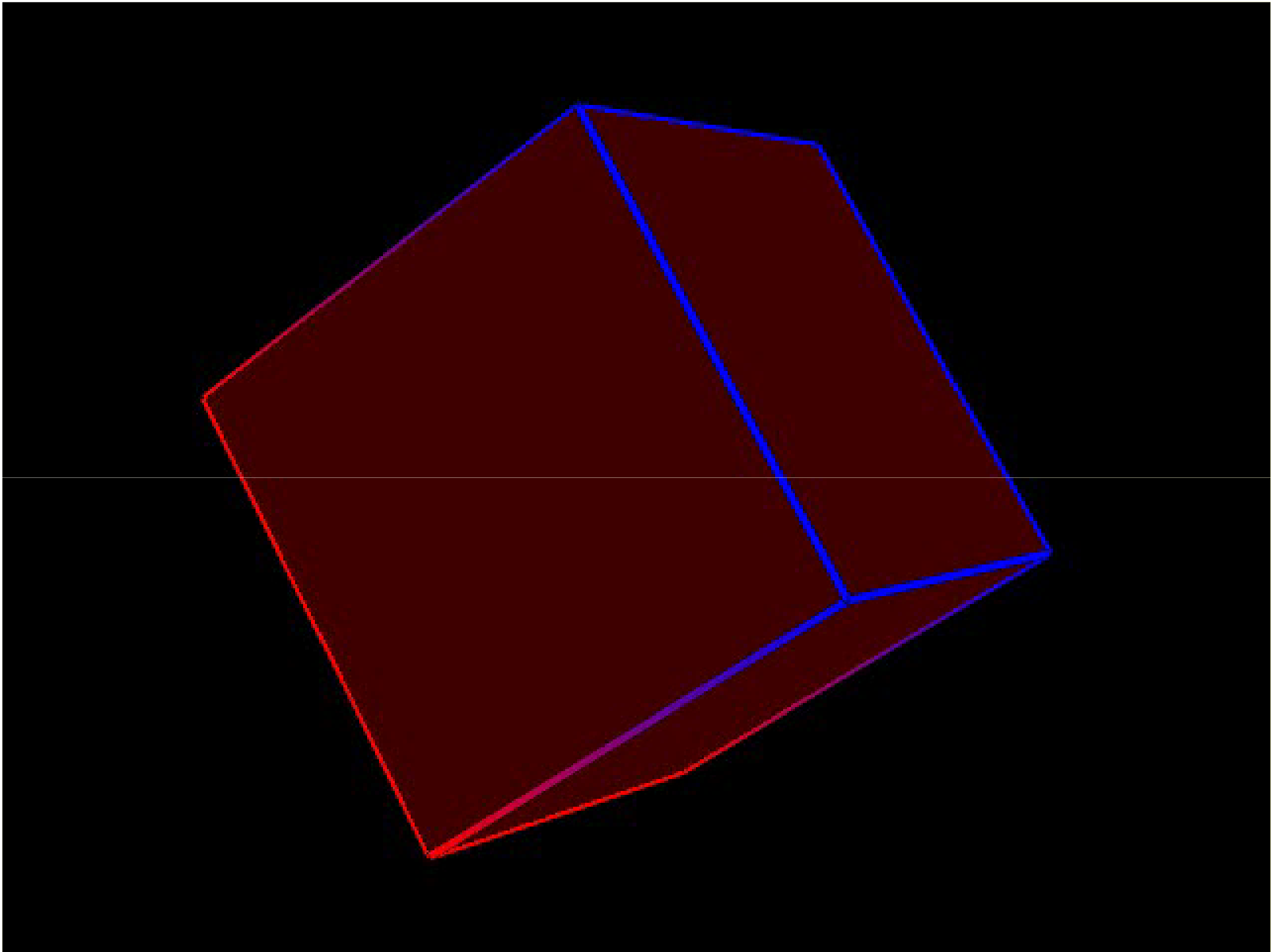
Spectre en absorption
Forêt Lyman-alpha

ou absorption
continue totale

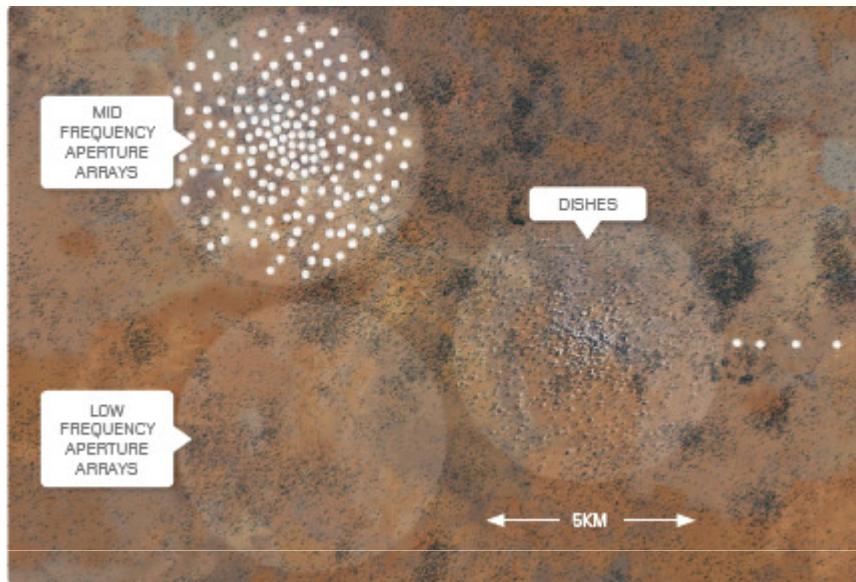
Réionisation



Percolation progressive des zones ionisées

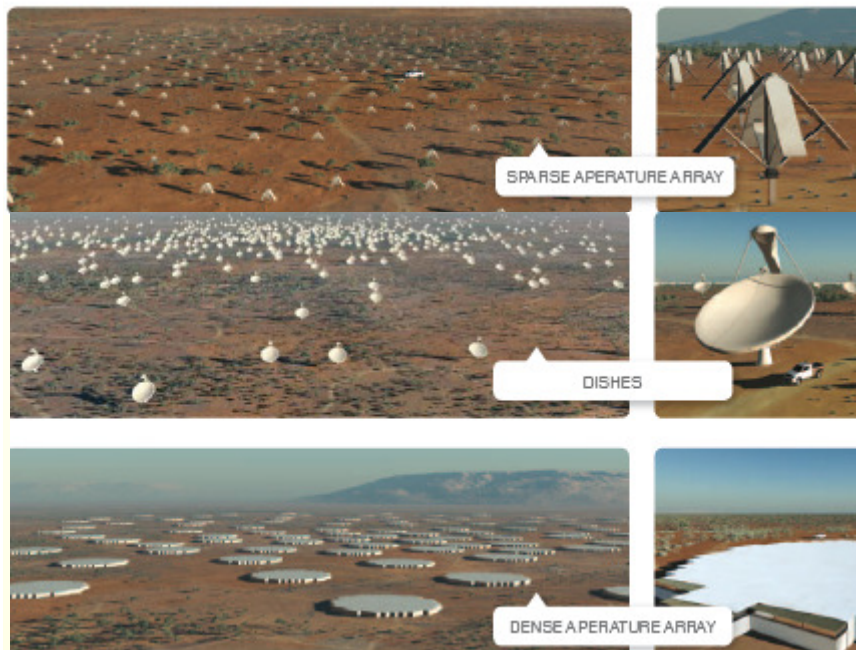


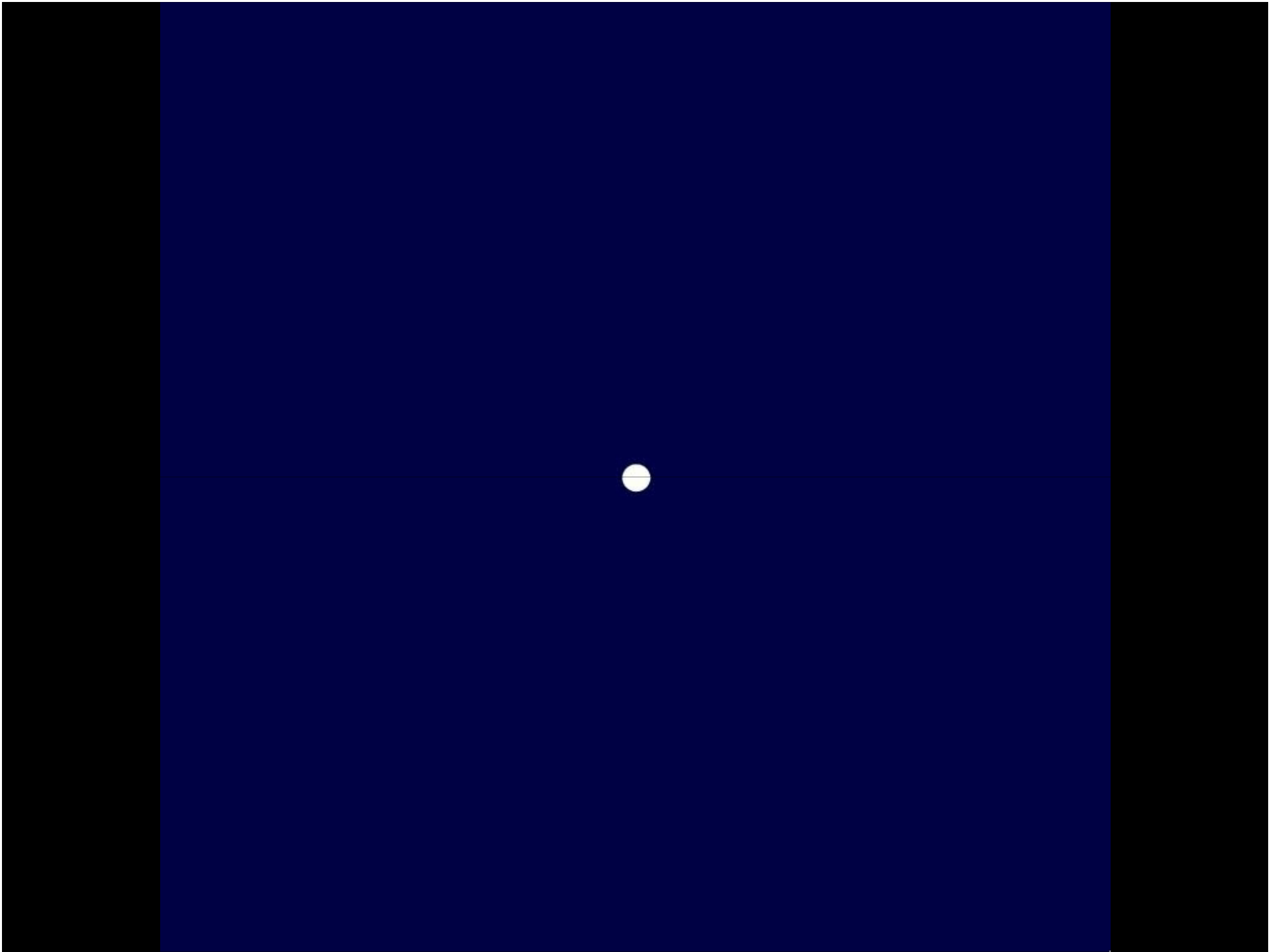
Réionisation: vue de SKA



Surface: un million de m²
3000km de ligne de base

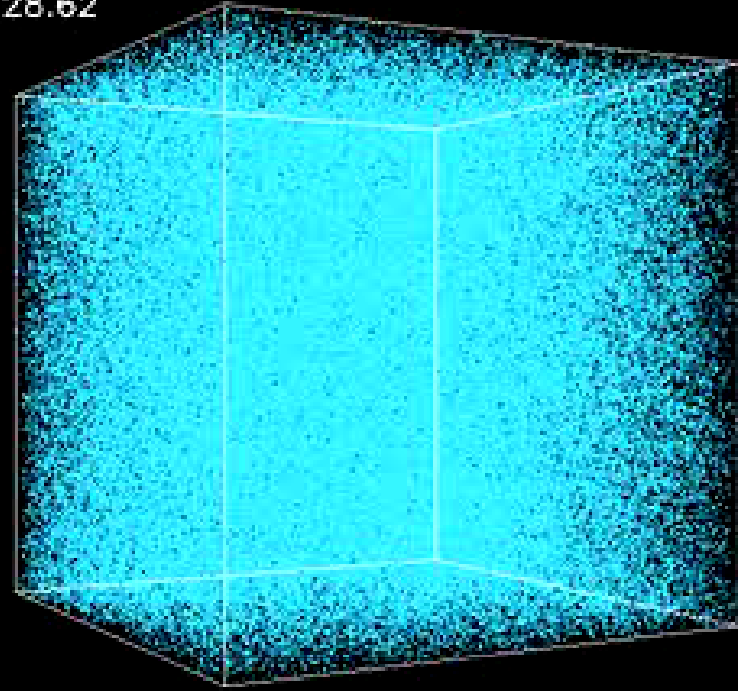
Projet mondial ondes m/cm
→ verra le HI-21cm redshifté
durant la réionisation



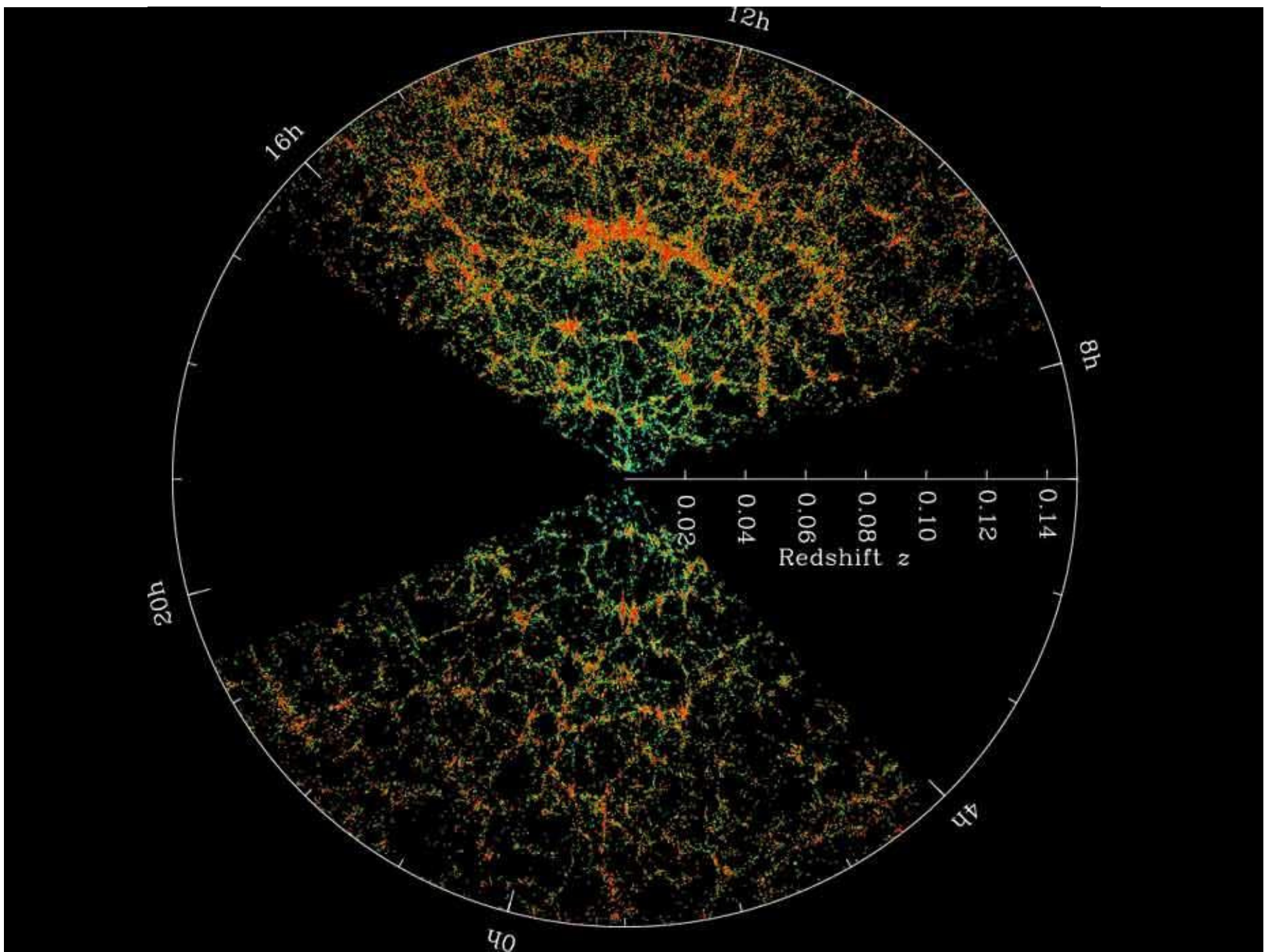




$Z=28.62$



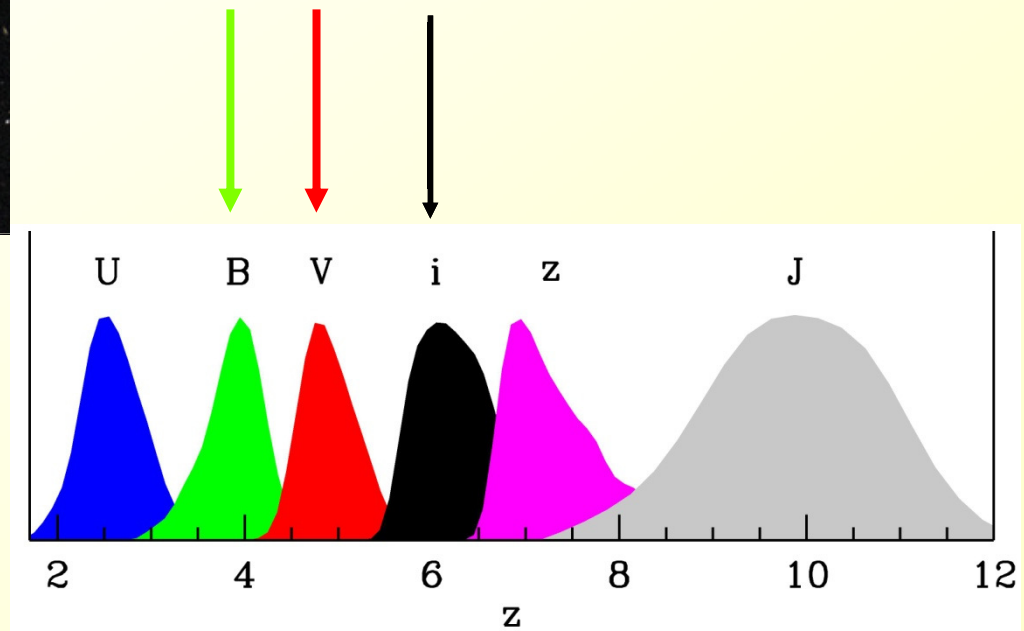
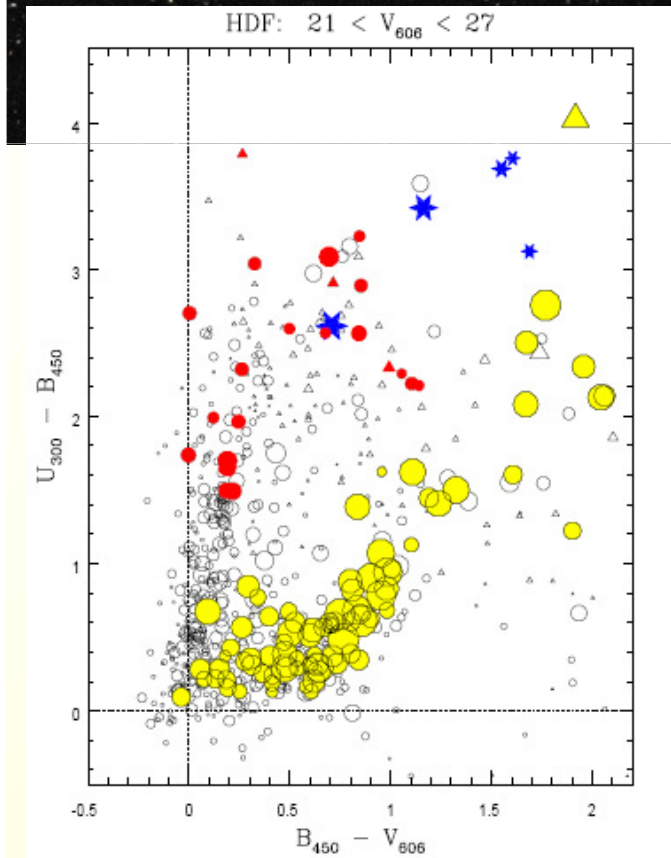
**Formation des
galaxies et
Simulation
cosmologique**



Techniques de Detection des galaxies

Galaxies à $z \sim 4, 5, \& 6$

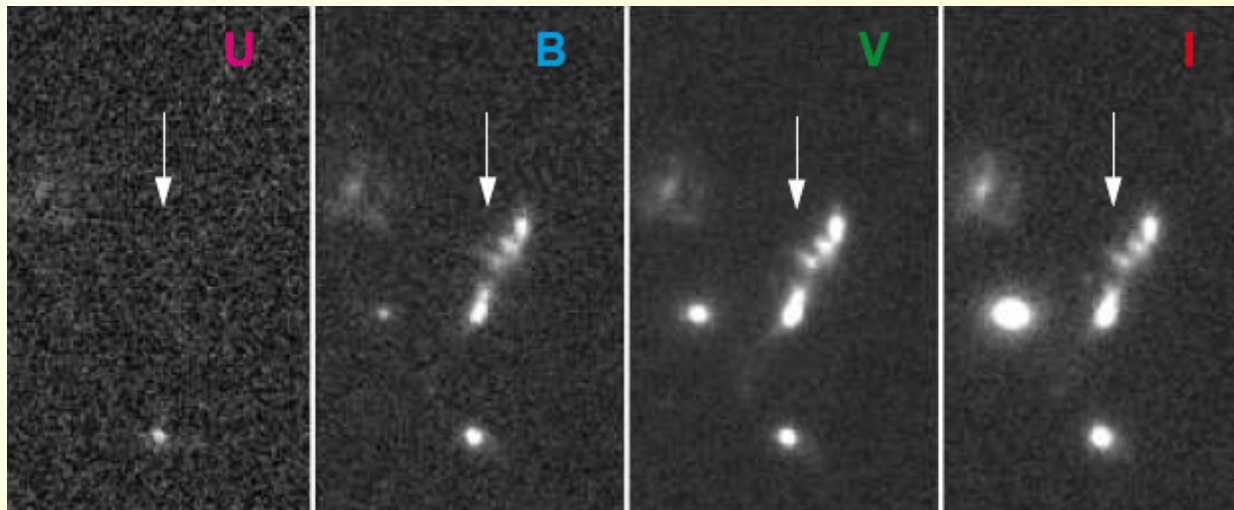
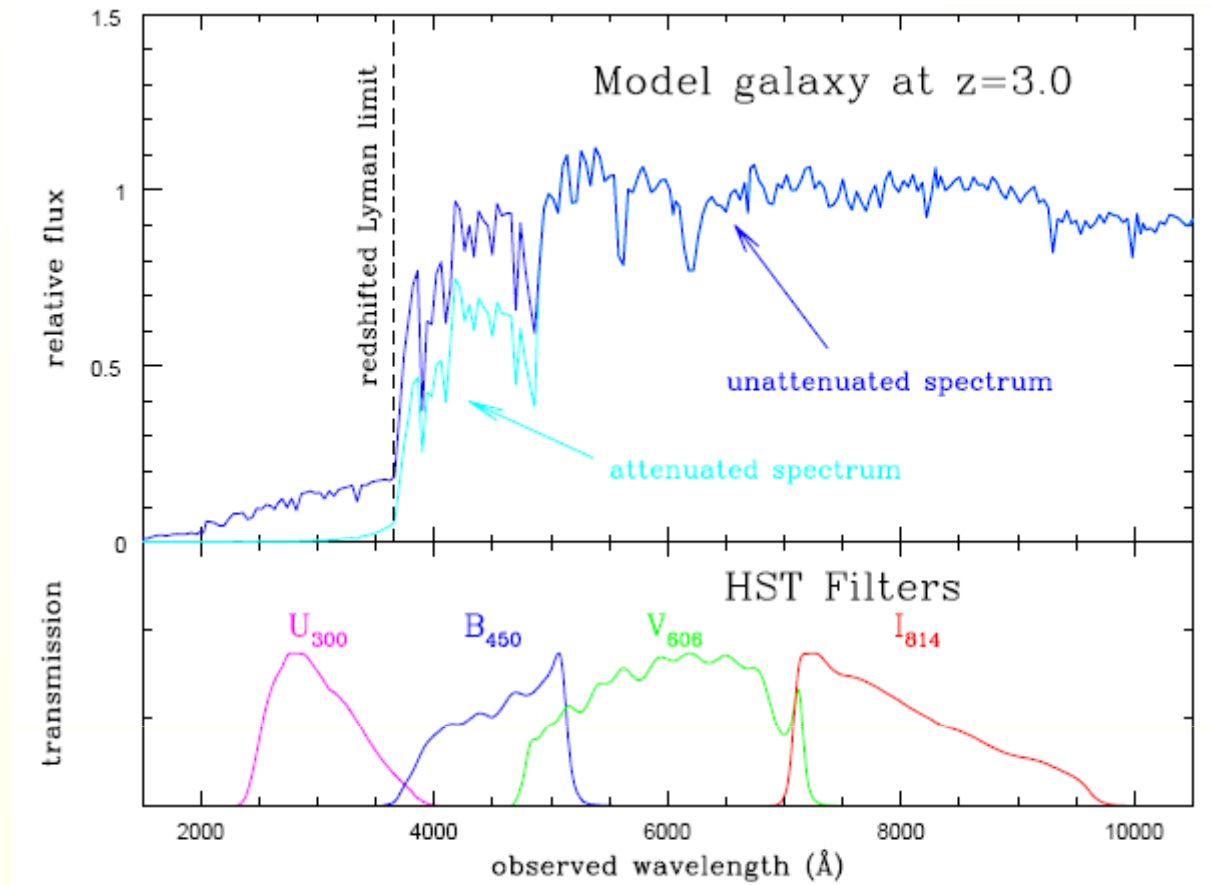
(*B, V, i-troncatures*)



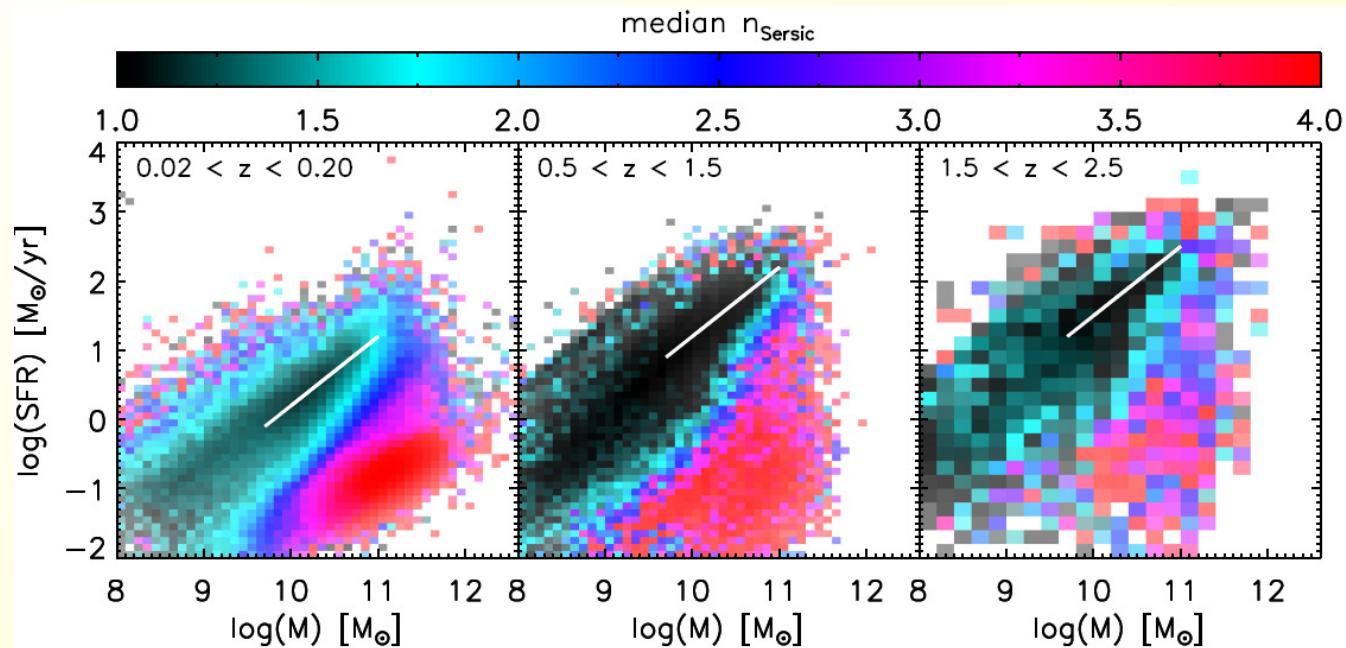
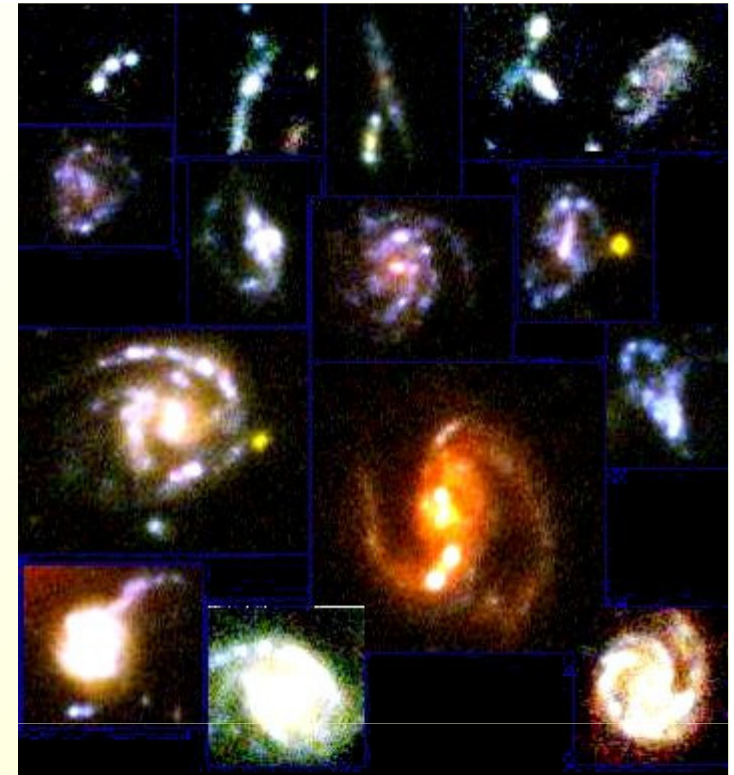
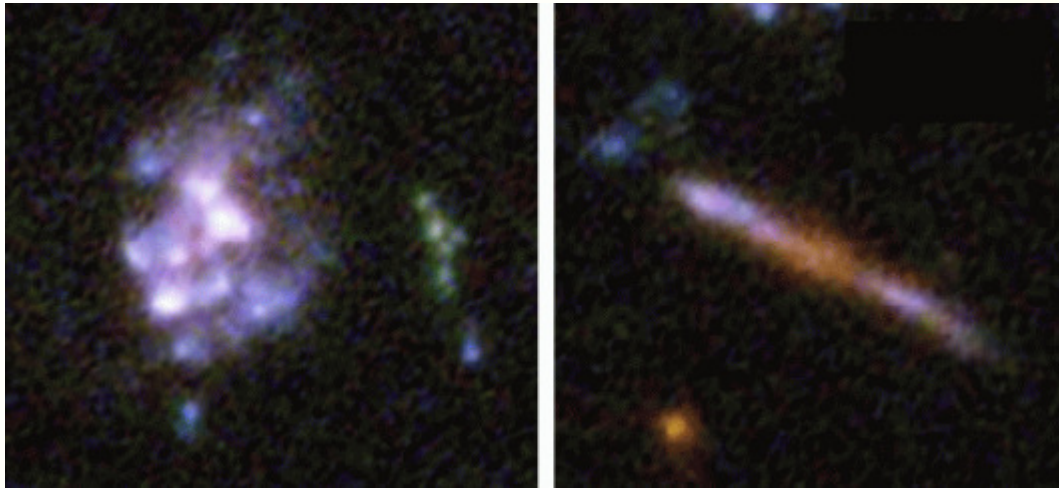
Spectres tronqués

Fonctions de selection par redshift

Technique de selection par couleur $z=3$

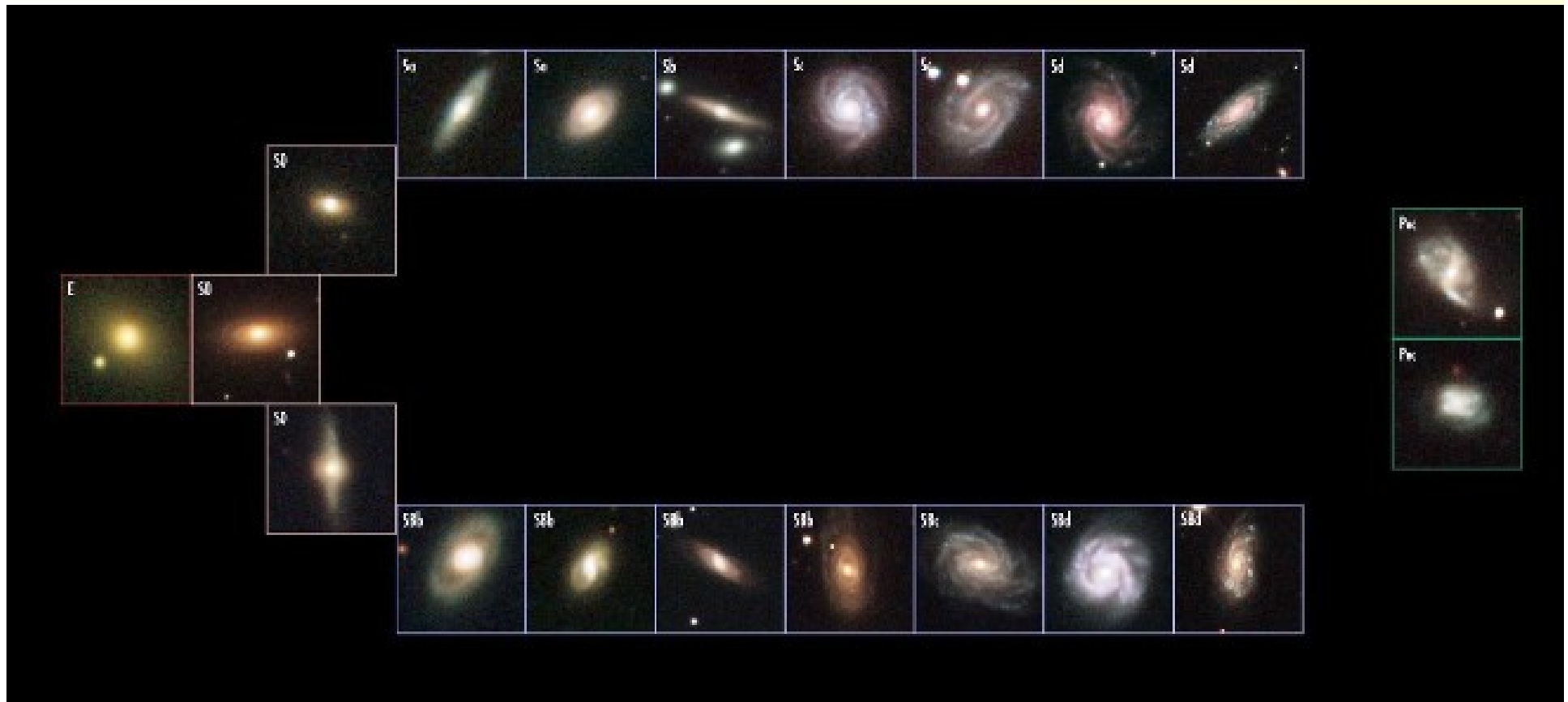


Galaxies plus irrégulières



Localement, galaxies régulières

Elliptiques ... Bulbe dominant ... Spirales ... Irrégulières



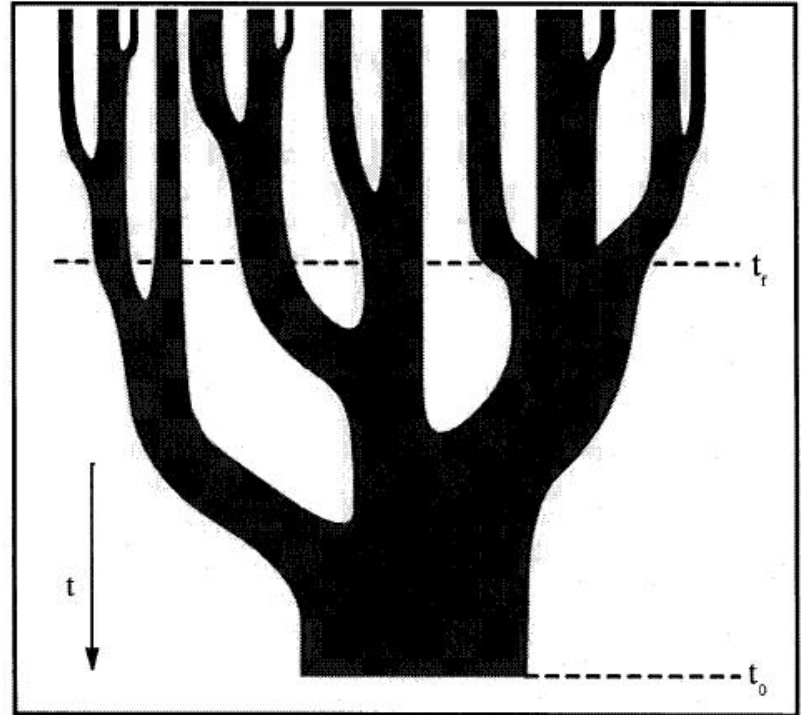
Séquence de Hubble

Formation hiérarchique des galaxies

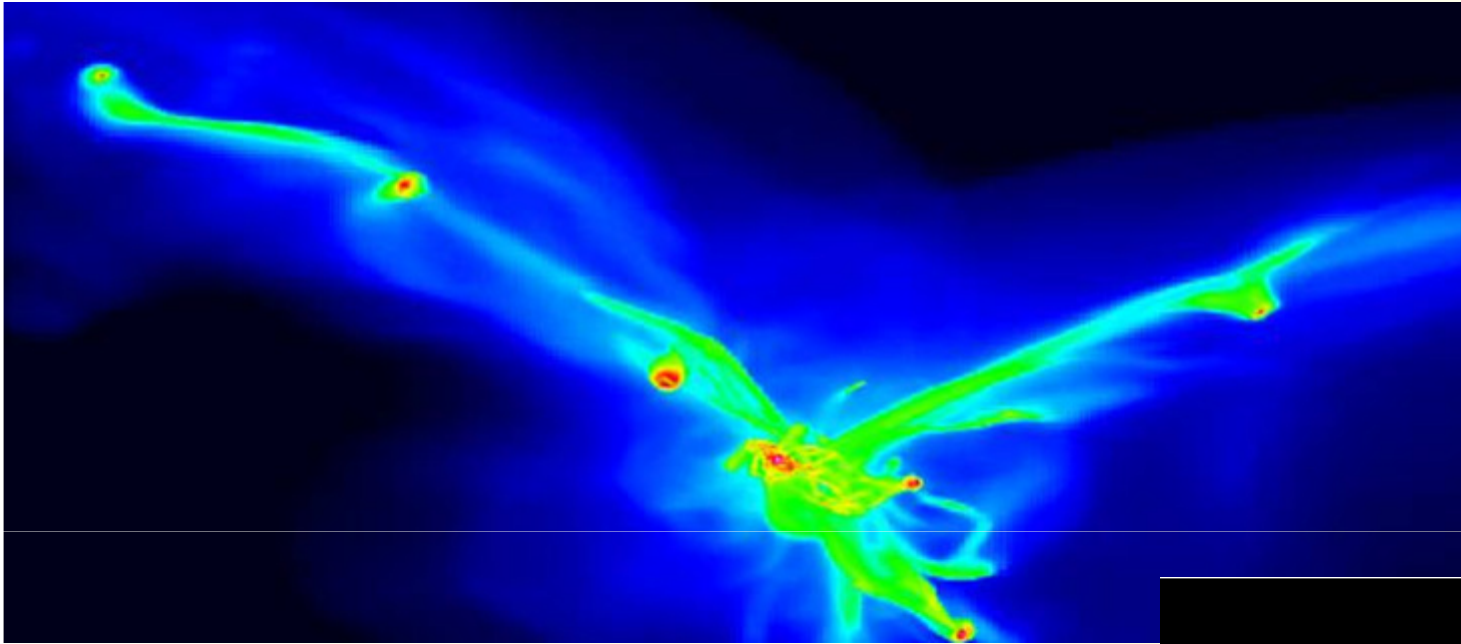
Les plus petites structures se forment en premier, de la taille de galaxies naines ou amas globulaires

Par **fusion successive et accréation** les systèmes de plus en plus massifs se forment

Ils sont de moins en moins denses

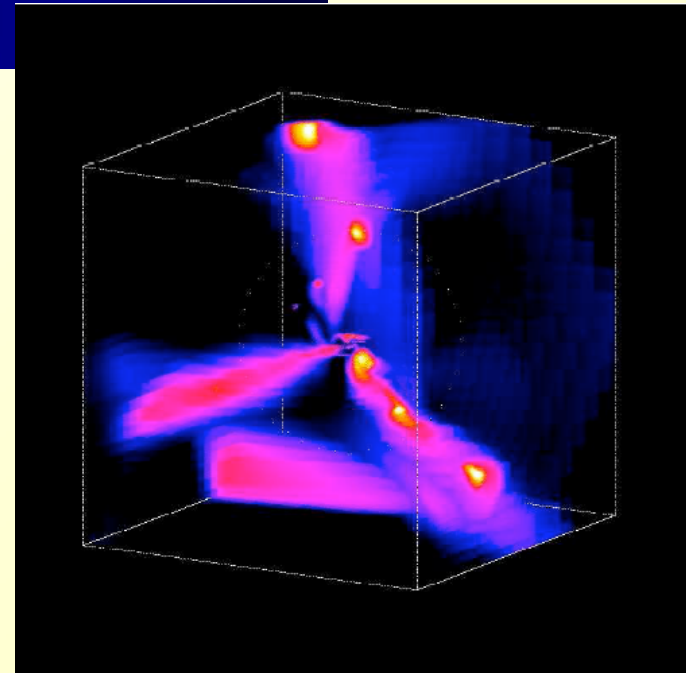


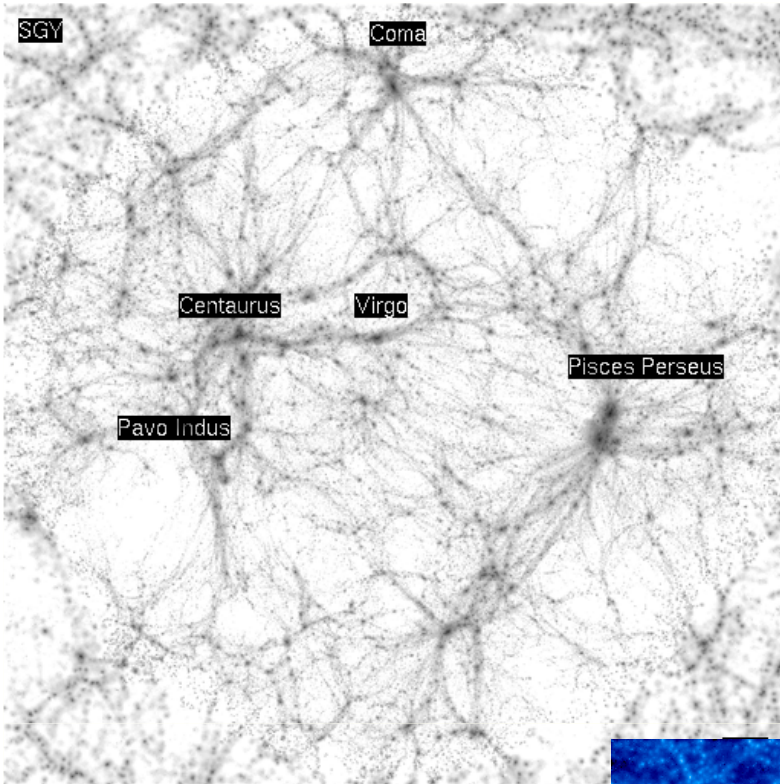
Filaments Cosmiques



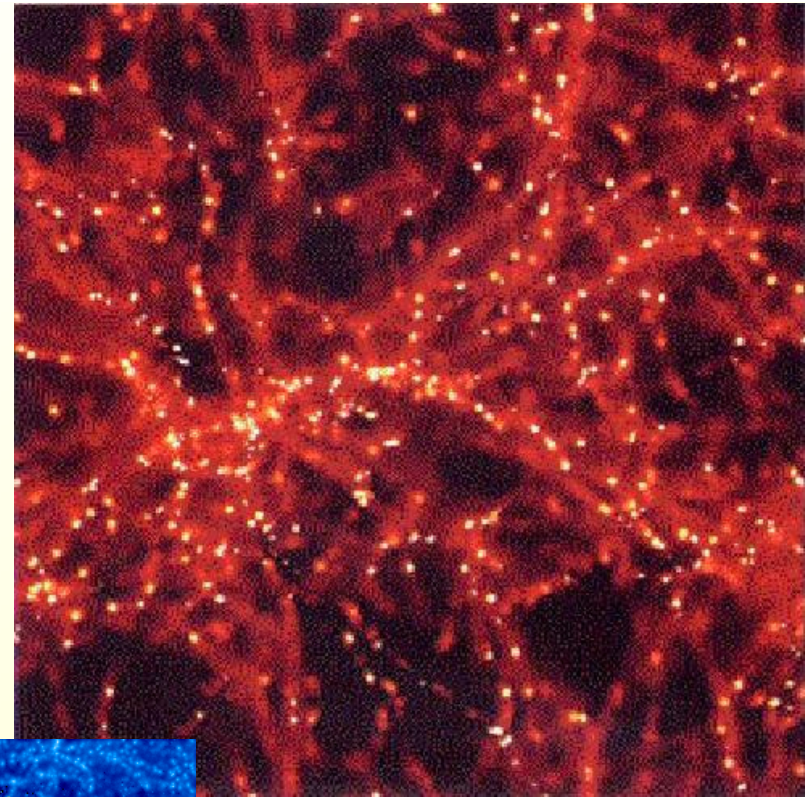
Galaxies se forment dans les filaments,
et amas de galaxies à la
croisée des filaments

→ Accrétion de gaz



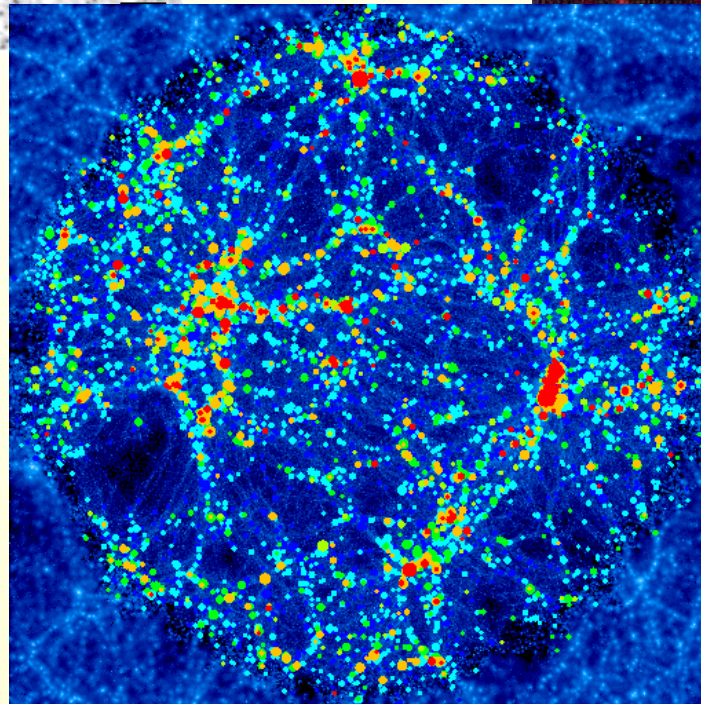


Gaz



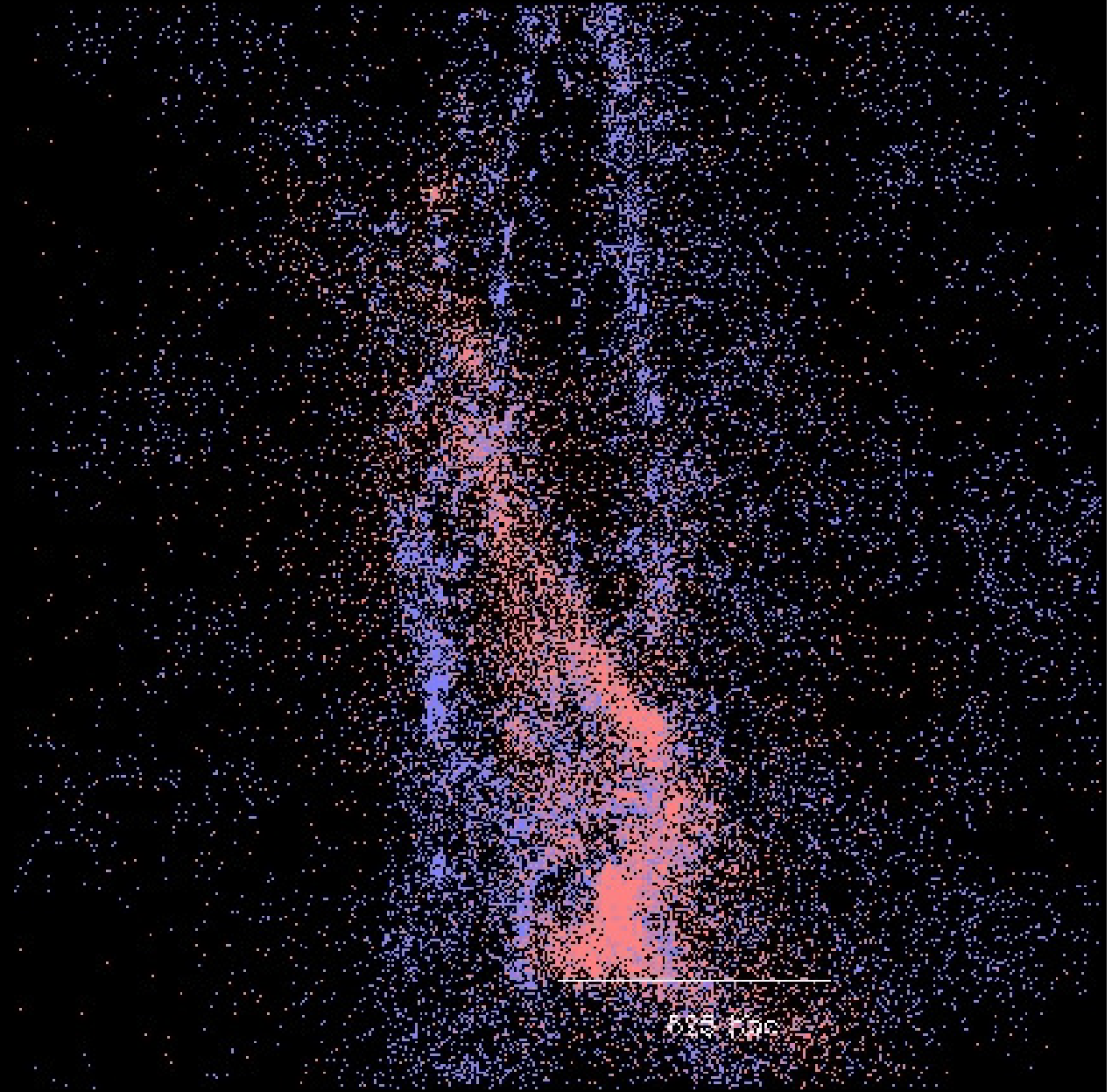
Matière noire CDM

Simulations



Galaxies

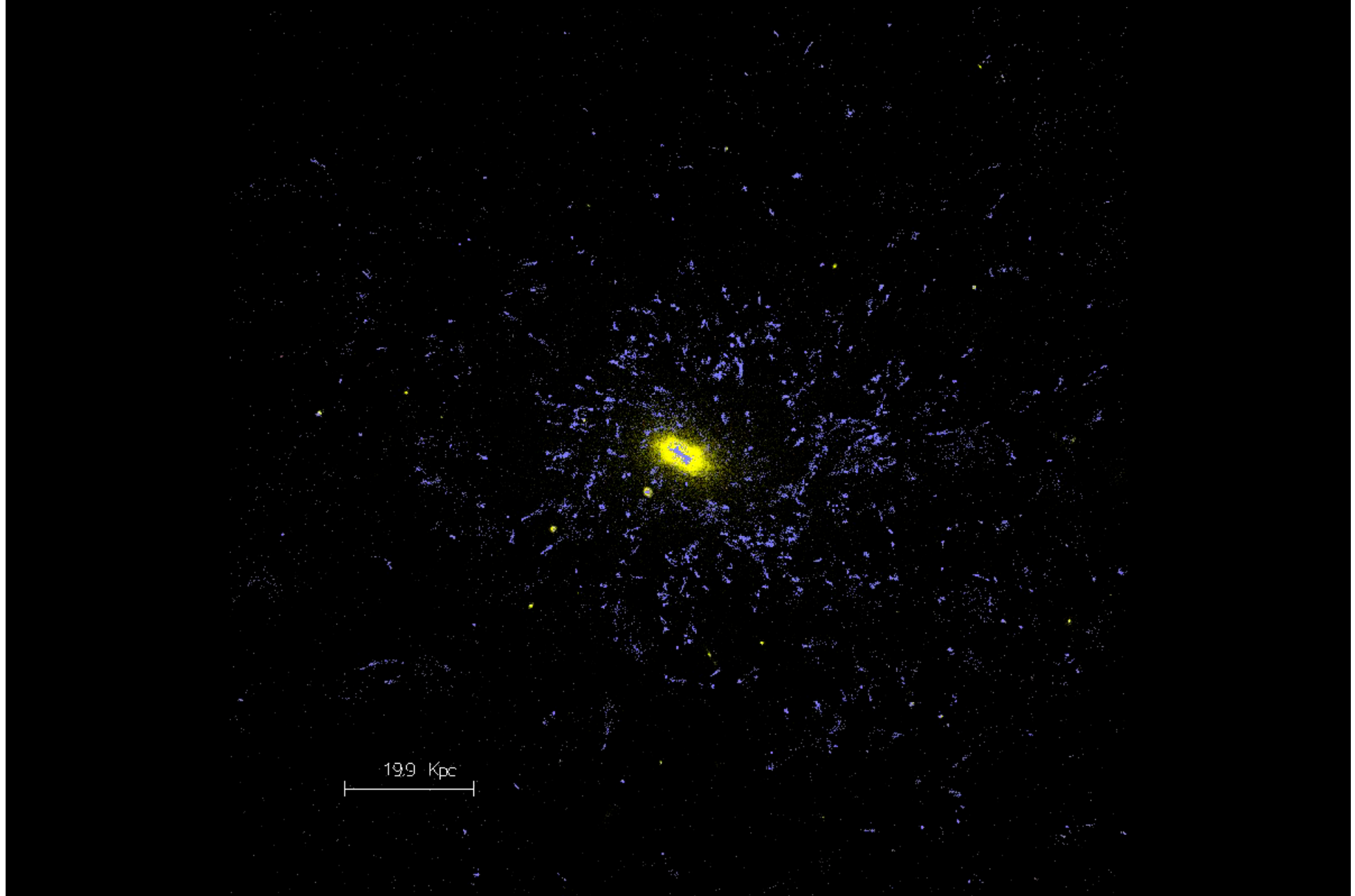
Galaxies et Filaments



Multi-zoom

100 kpc

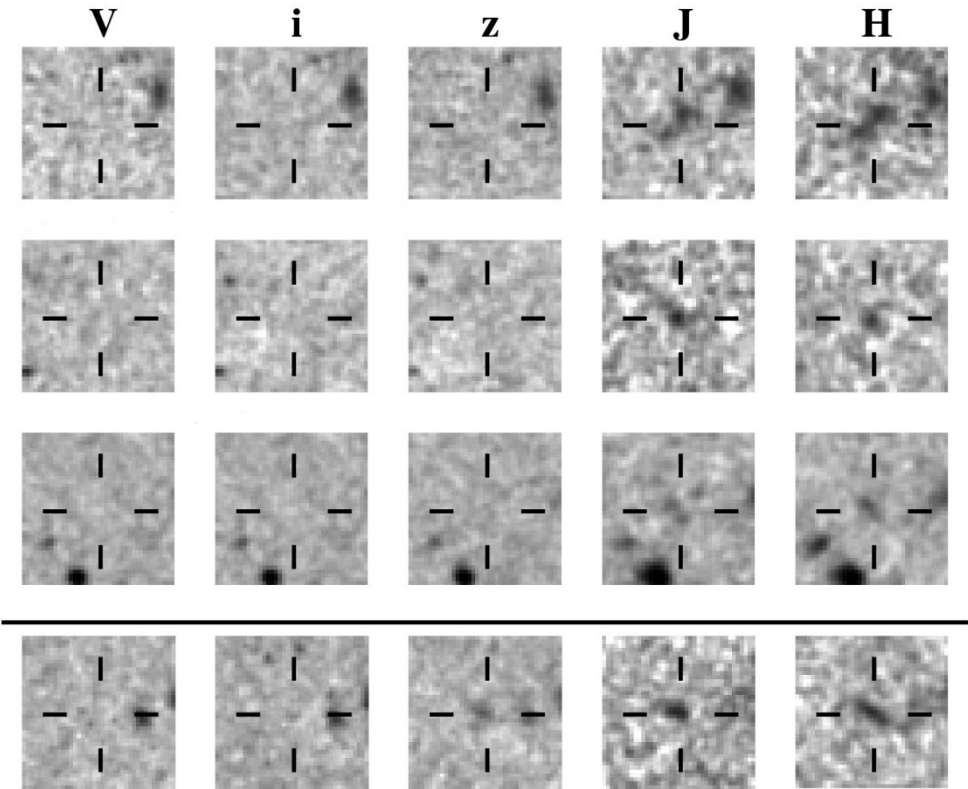
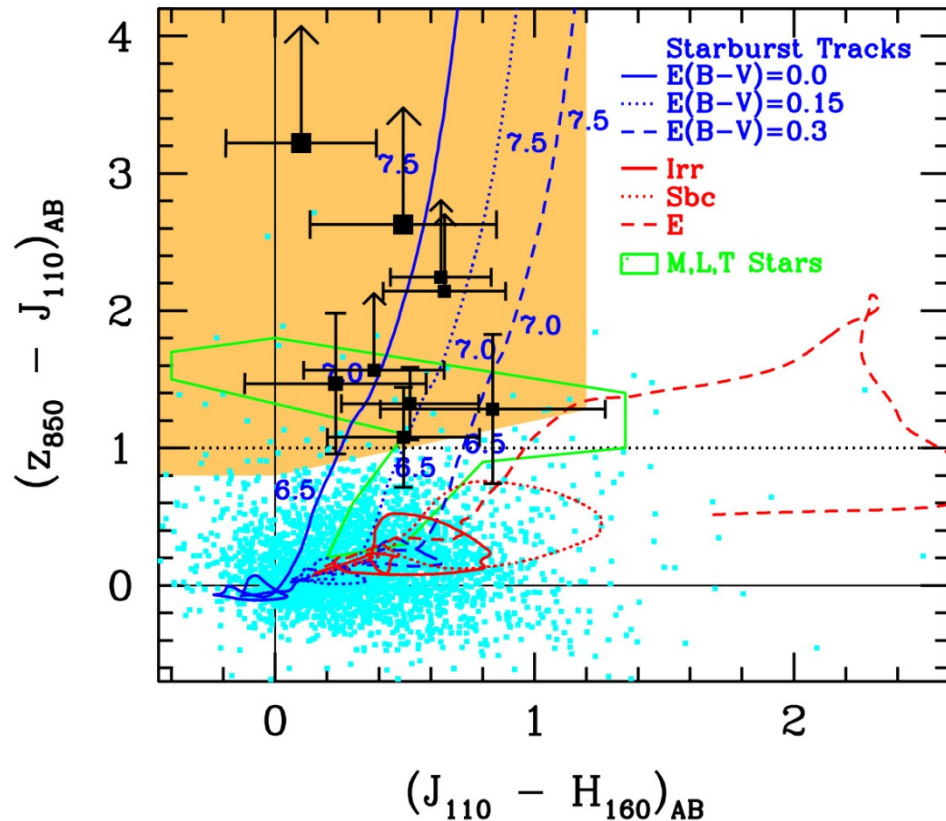
Interactions entre galaxies → fusion



Galaxies à $z=7, 8$

Sélection par couleurs

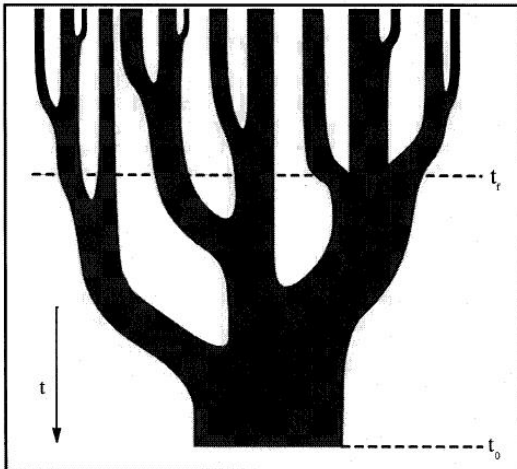
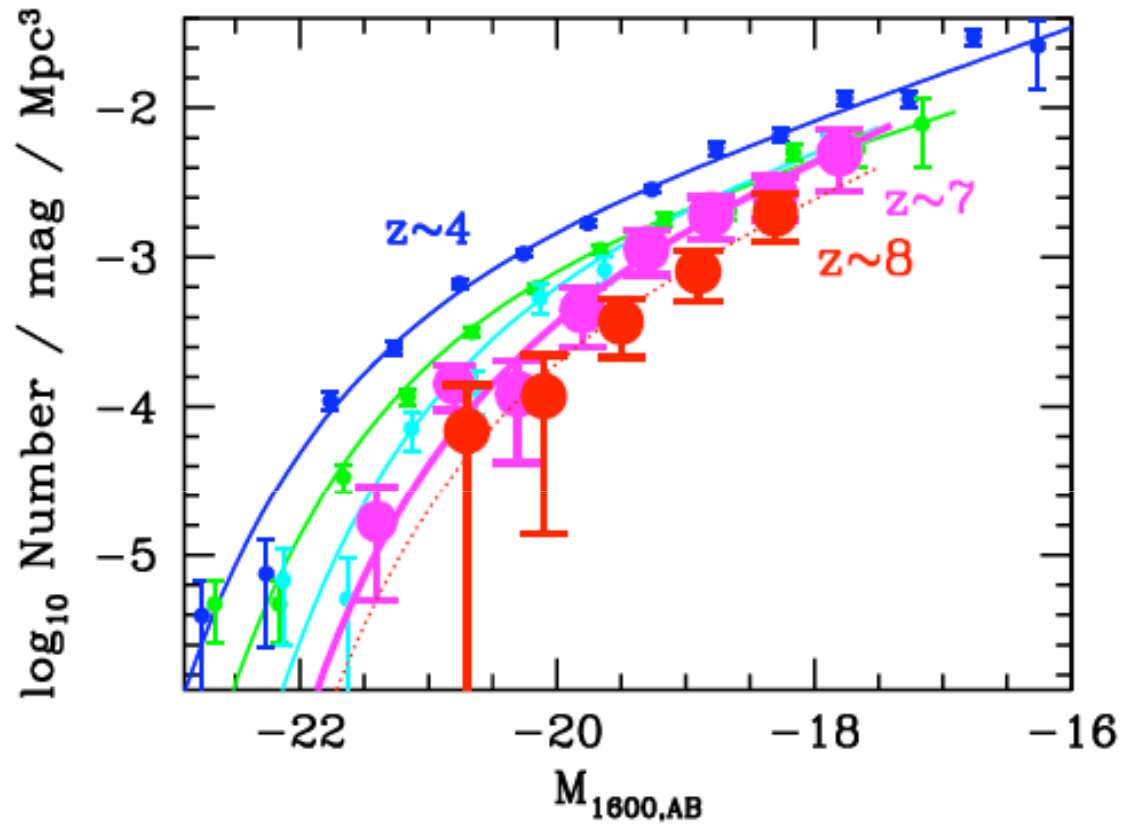
Et disparition du flux dans le bleu, par absorption du milieu intergalactique



Telescope Spatial Hubble

Fonction de Luminosité à $z=7,8$

Nbre de galaxies
 $\text{mag}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$

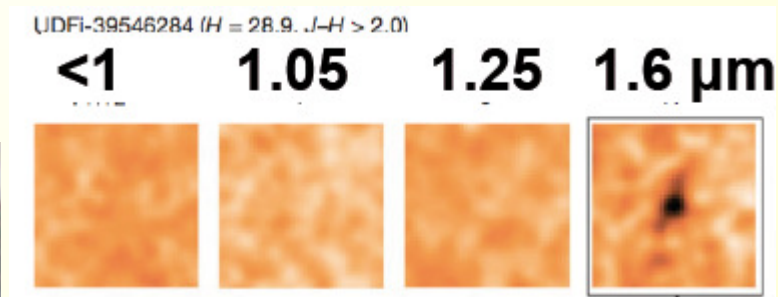
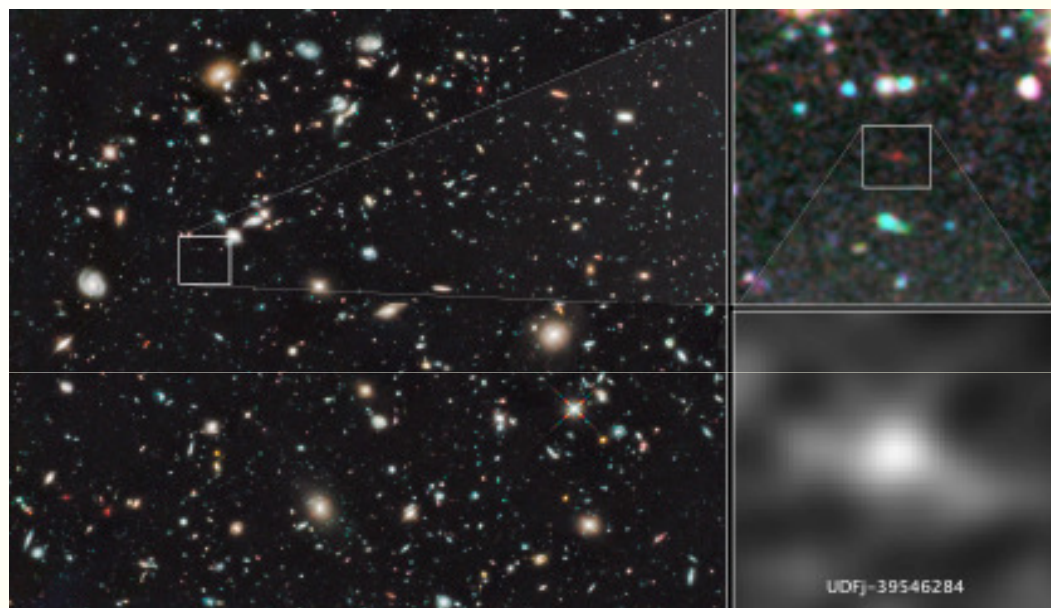


Brillant

Faible

Quelle est la première galaxie?

Candidats à $z=10$

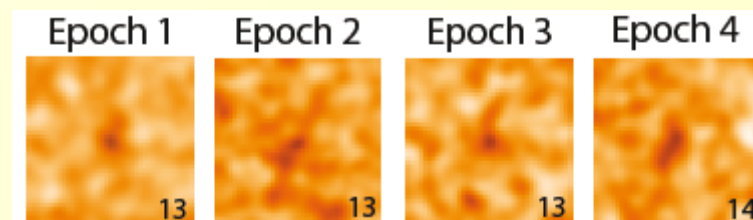
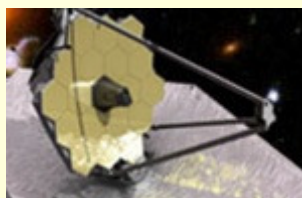


Disparition à $\lambda=1.4$ microns

Observations difficiles, à la limite des capacités des télescopes

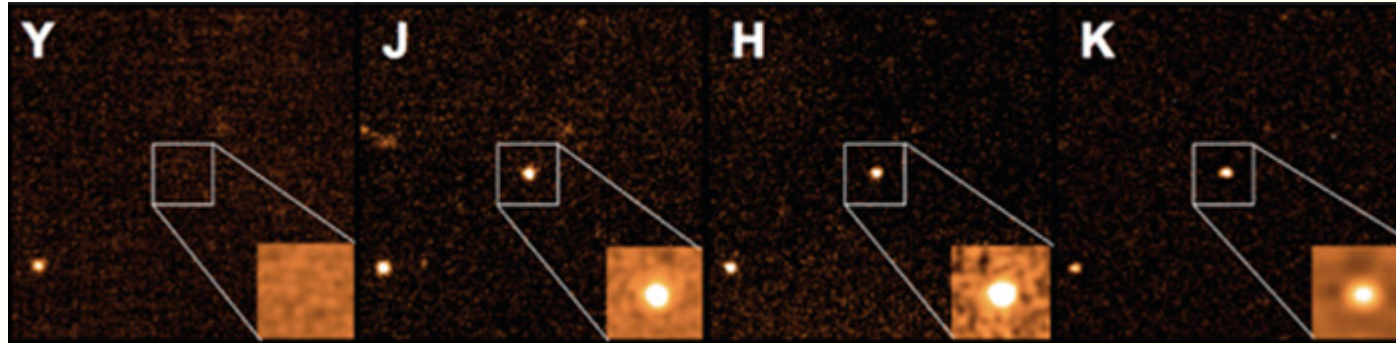
→ JWST

6.5m, 2018



Detectée dans chaque sous-groupe des observations

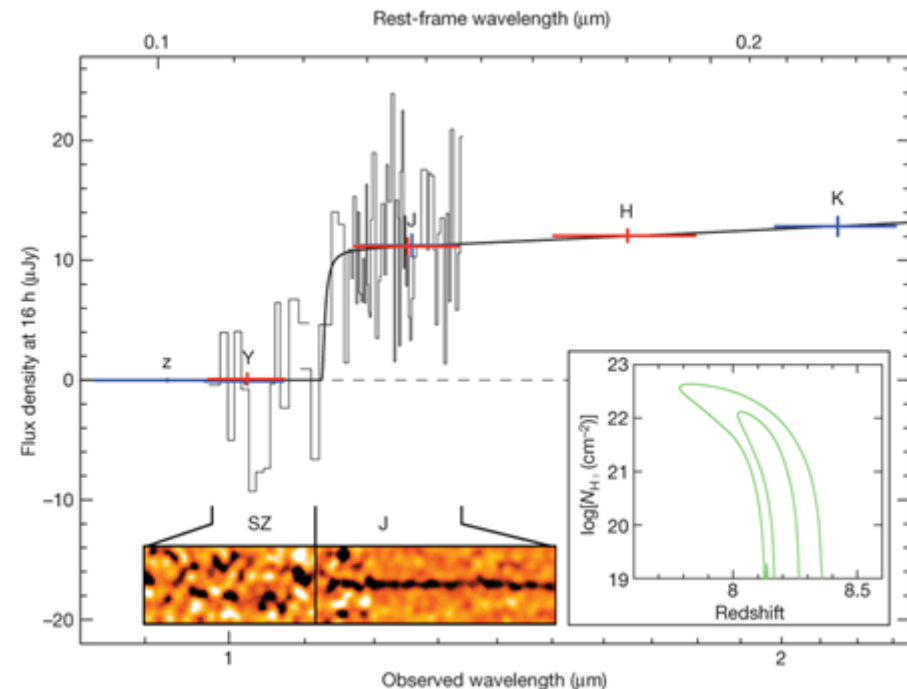
Les sursauts Gamma (GRB)



Objets les plus lumineux
Pendant 1-10 secondes

(dilatation du temps de $(1+z)$)

Effondrement d'une super-étoile
Ou bien fusion de deux objets
compacts (étoiles à neutrons)

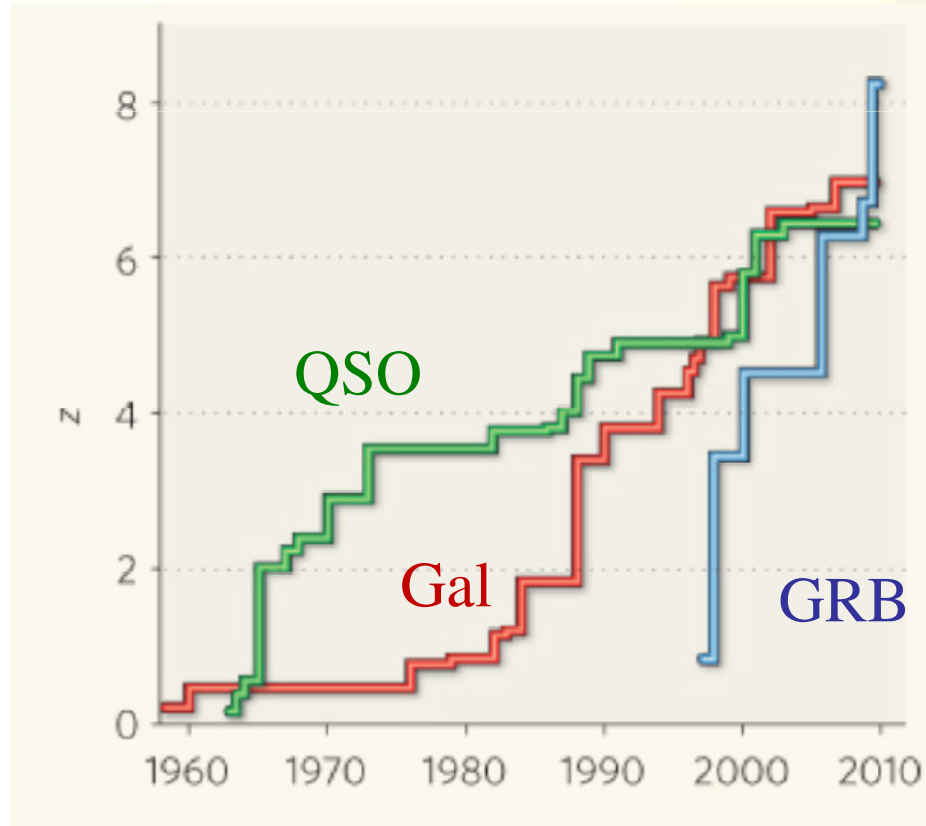
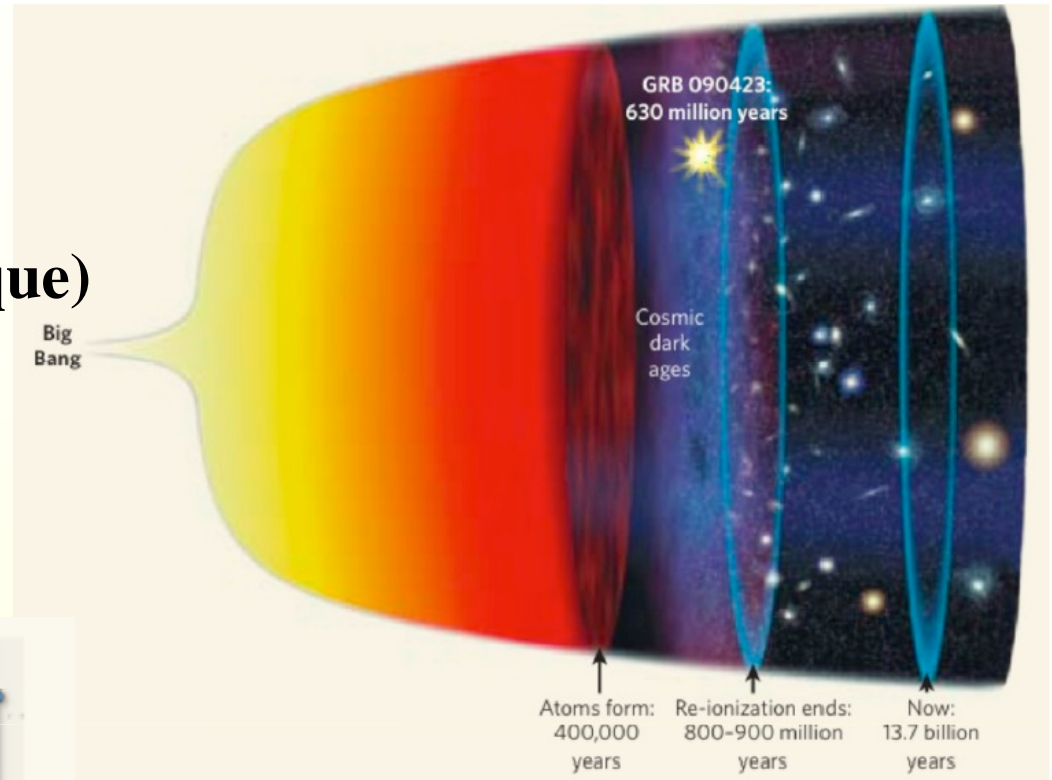


GRB= sursauts γ

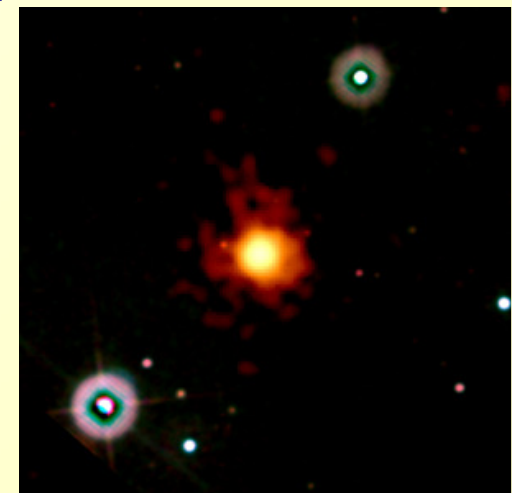
L'objet le plus lointain

un GRB à $z=9.4$ (z photométrique)

~500 ma après le Big-Bang, ou
100 ma après la recombinaison

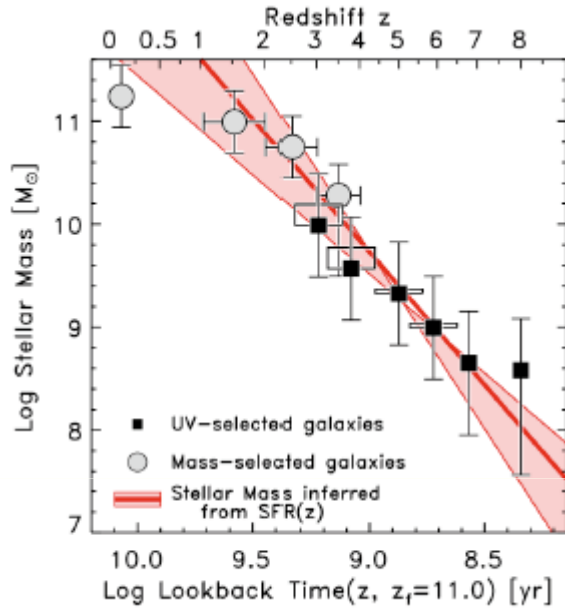


X-ray, optique, $z=8.2$
190 ma après recombinaison



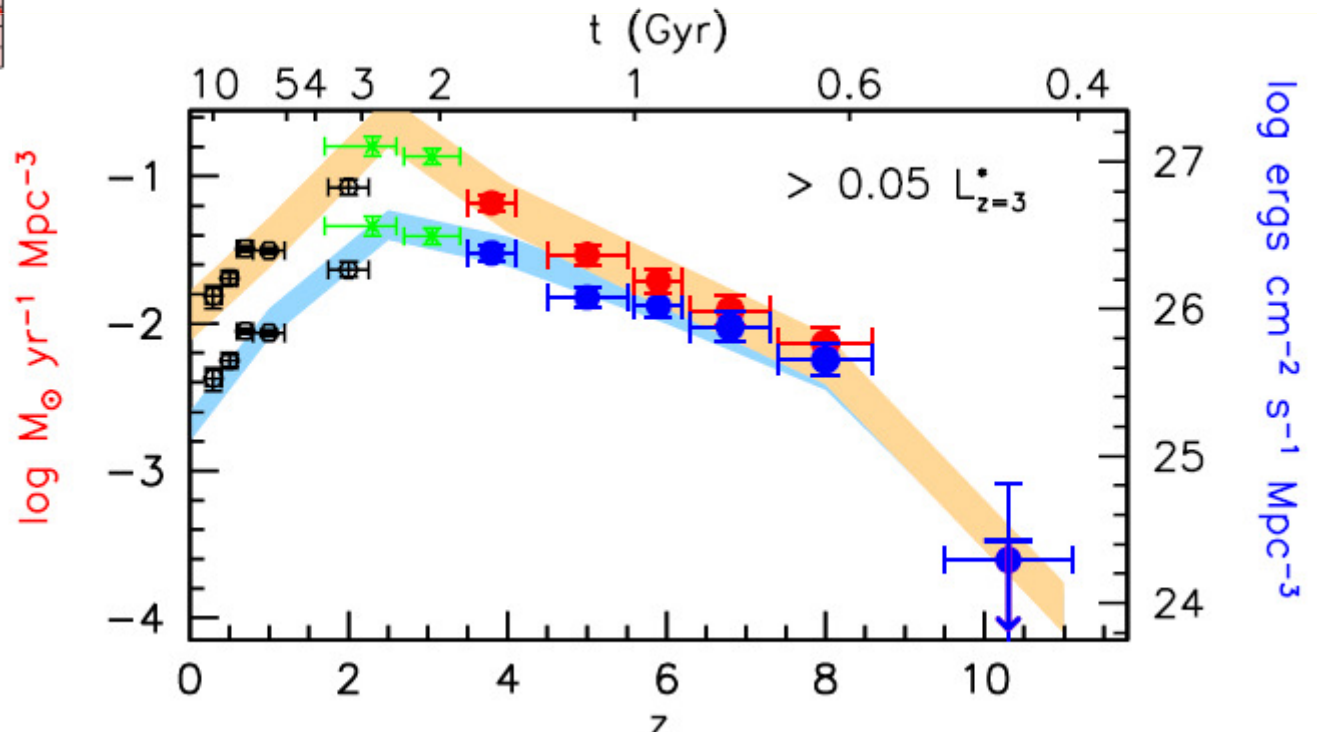
Histoire de la formation d'étoiles de l'Univers

Masse d'étoiles (t)



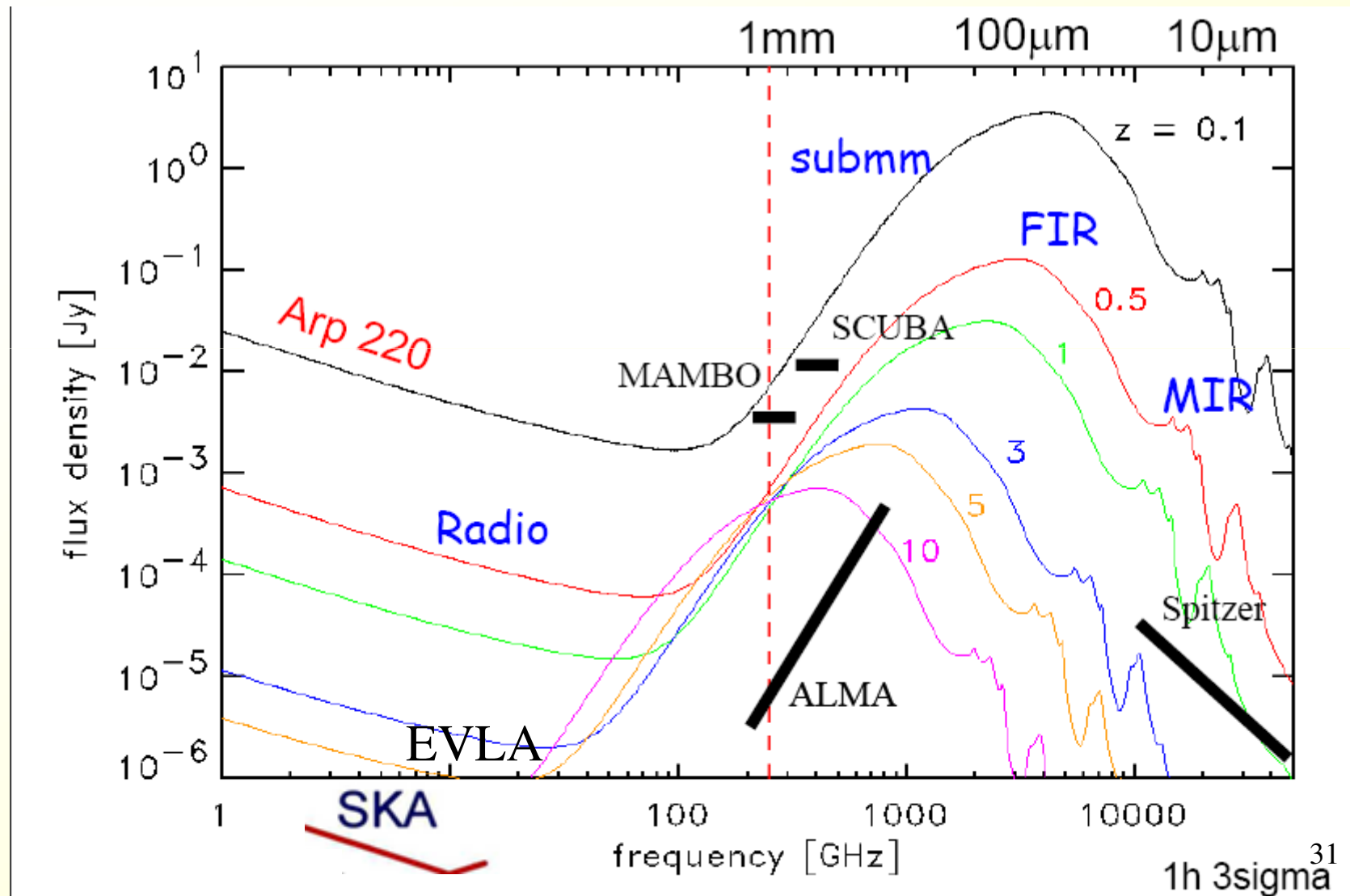
Quand se sont formées l'essentiel des étoiles dans la Voie Lactée et les galaxies proches?

Taux de formation:
 → Bleu: optique
 → Rouge IR, FIR obscurci par la poussière

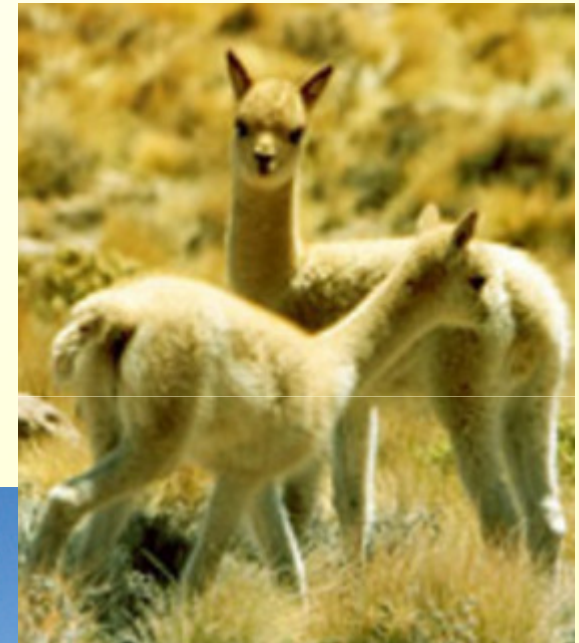


Privilège du domaine mm/submm

Correction cosmologique négative: exemple de Arp 220



Nouveau télescope: interféromètre ALMA

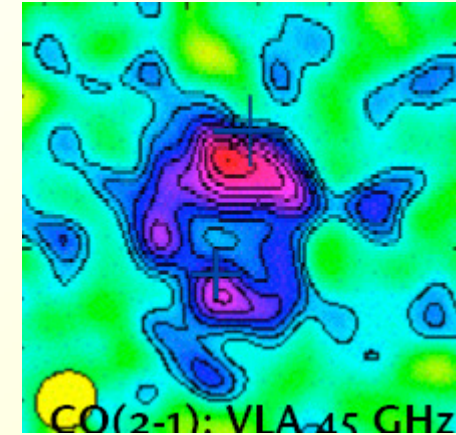


Molécules CO des galaxies $z > 4$

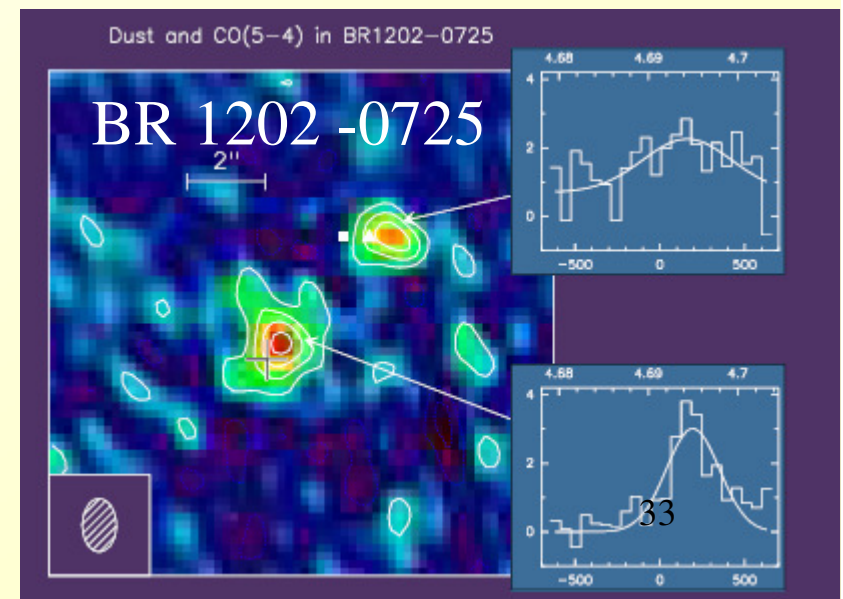
Pratiquement toutes amplifiées !

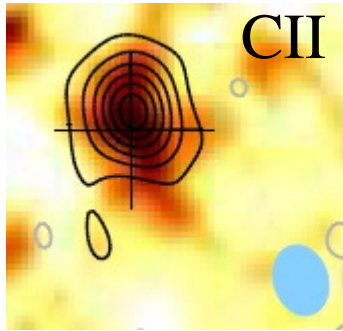
		z
PSS J2322 +1944	QSO	4.12
BRI 1335 -0417	QSO	4.41
BRI 0952 -0115	QSO	4.43
BR 1202 -0725	QSO	4.69
TN J0924 -2201	QSO	5.19
SDSSJ1148+5251	QSO	6.419

+ 6 quasars à $z=6$



PSS J2322 +1944

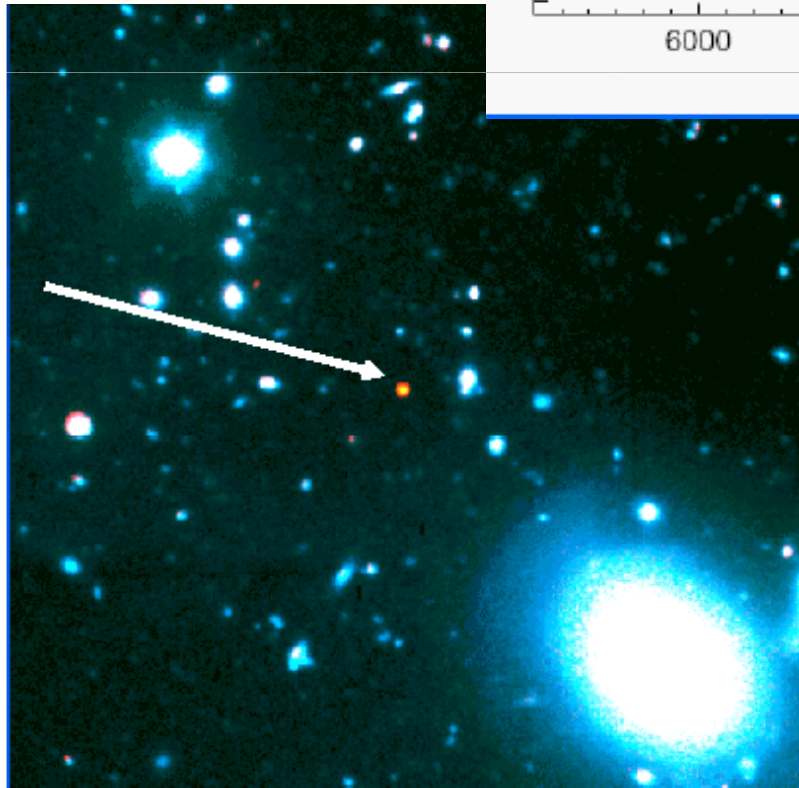
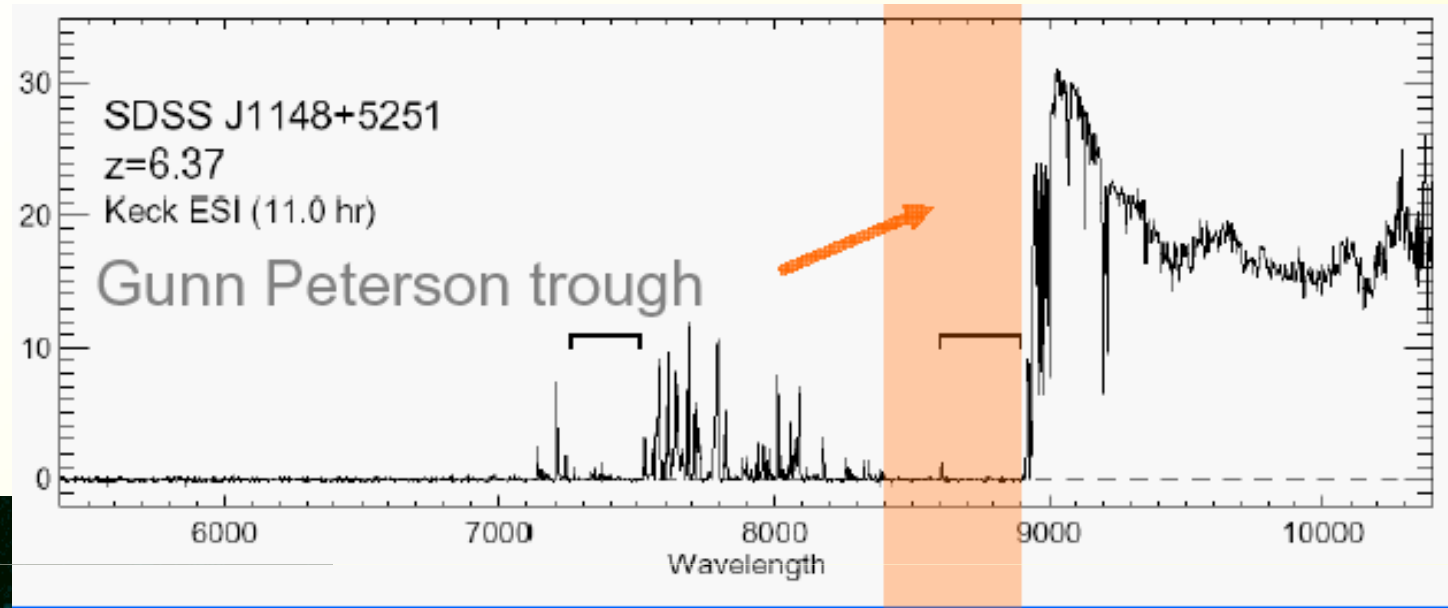




Lobe 0.3" PdB

Age ~ 1 Ma

Les QSO les plus distants z=6-7



$$M_{\text{gaz}} \sim 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{\text{trou noir}} = 1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$$

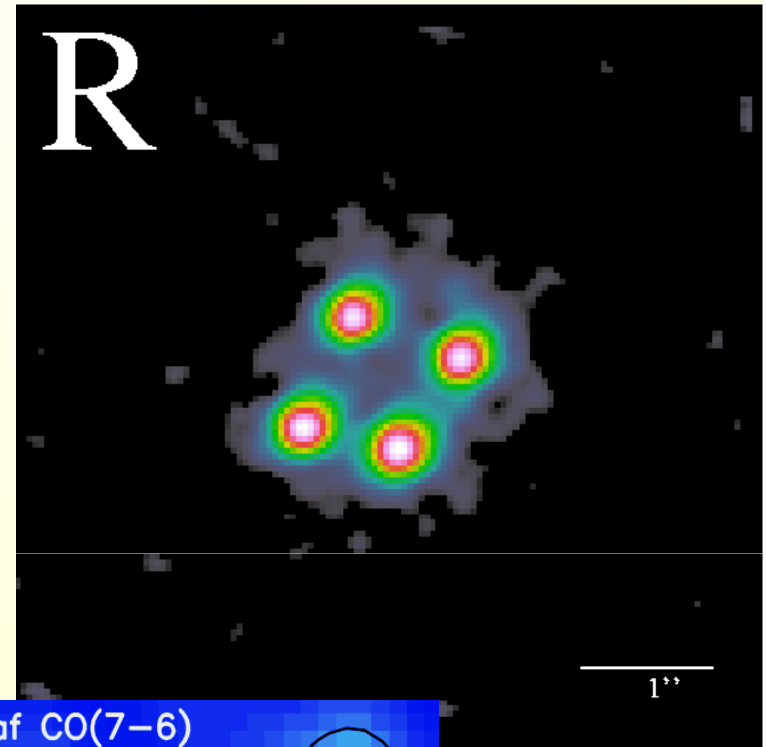
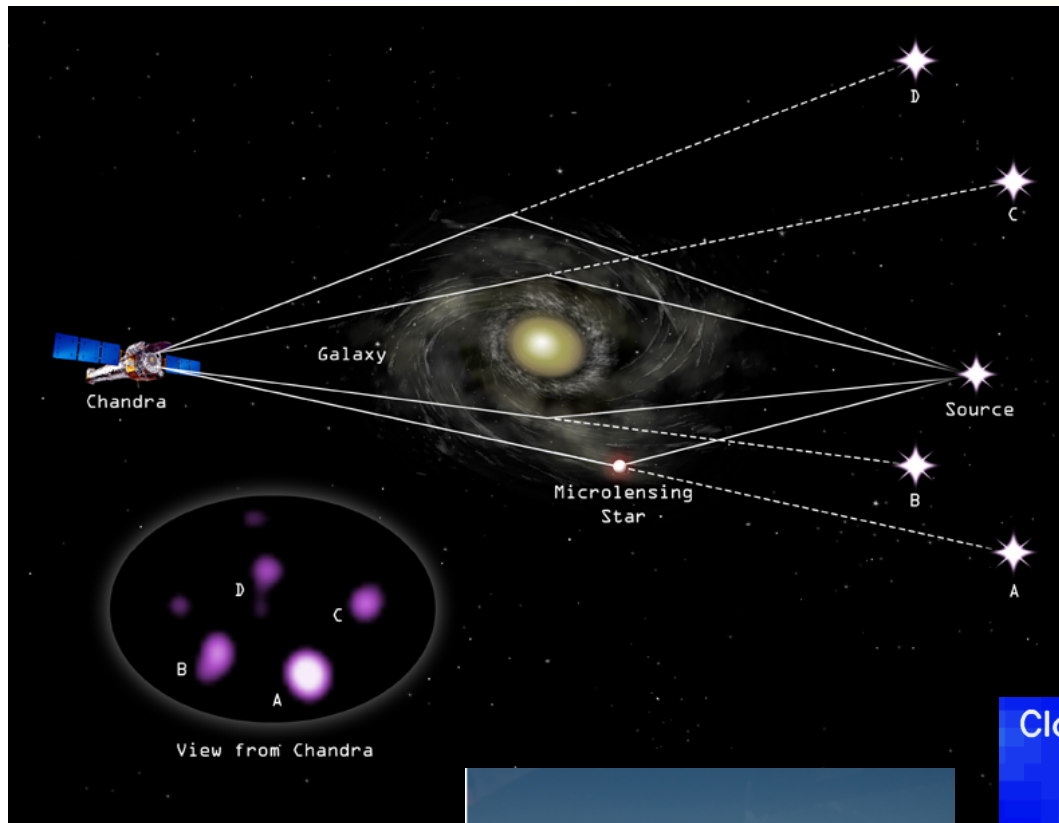
Pas de HCN détecté

CO, CII

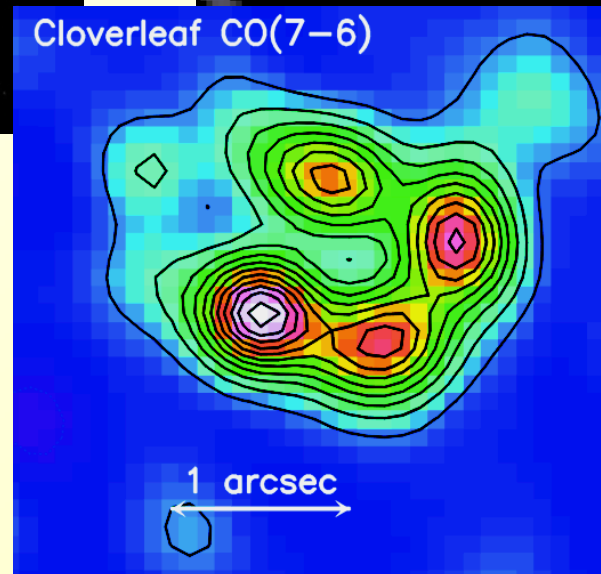
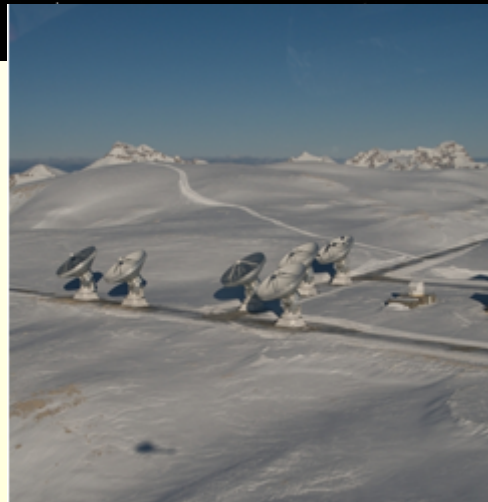
Formation d'étoiles 1000 Mo/an/kpc²

+ Quasar à z=7.1

Le quasar trèfle à quatre feuilles



IRAM
Plateau de
Bure
Interféromètre



Haute densité à grand z

HCN détecté à grand z , trace $n_{\text{H}_2} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$

Trèfle à 4 feuilles $z=2.56$: dominé par un starburst

CO, HCN, HCO+ trace le gaz dense et chaud formant des étoiles

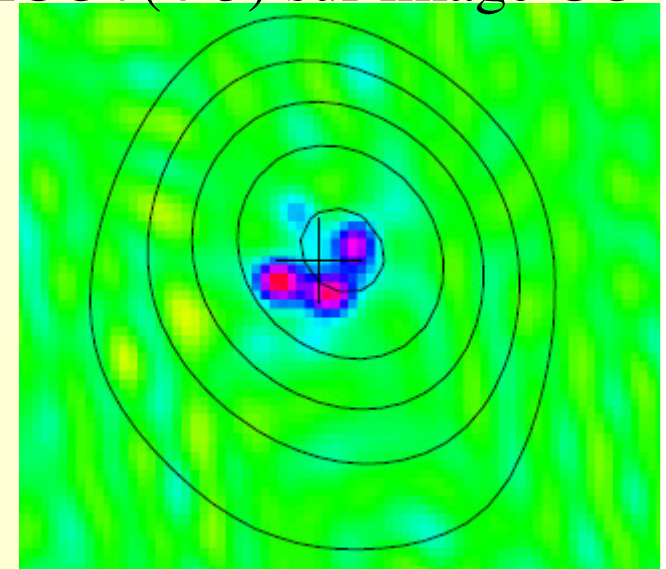
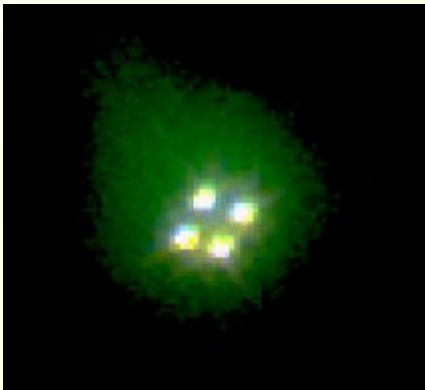
Le quasar n'est pas visible

Dans APM08279+5255, excitation radiative + collisionnelle

→ Trou noir ($z=3.91$)

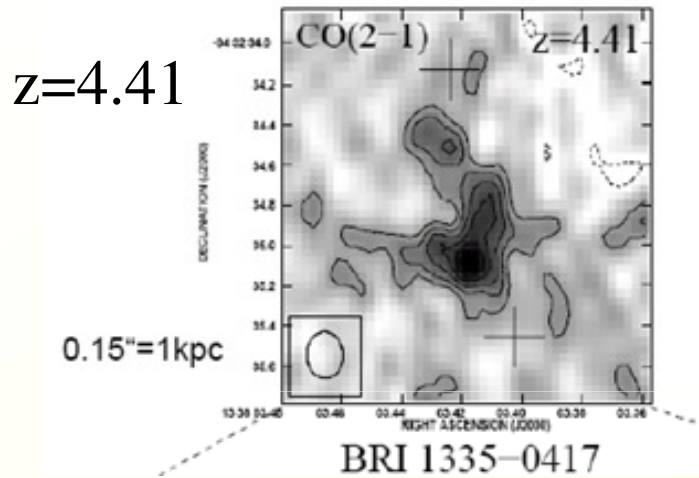
Contours HCO+(4-3) sur image CO

HCN (vert) sur image optique



Gaz Moléculaire à l'échelle des nuages

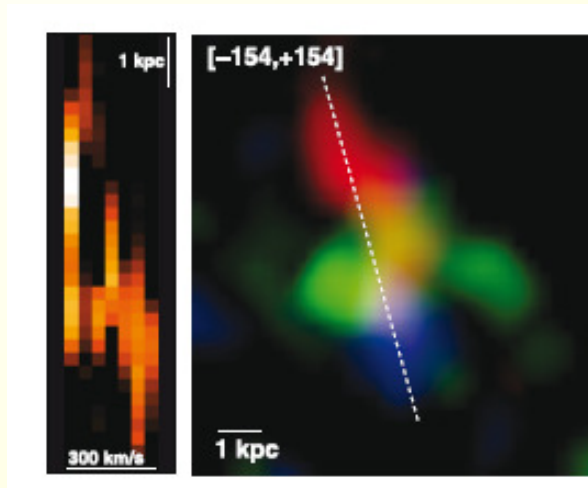
Fusions de galaxies, 1.4 Ma après le Big-Bang



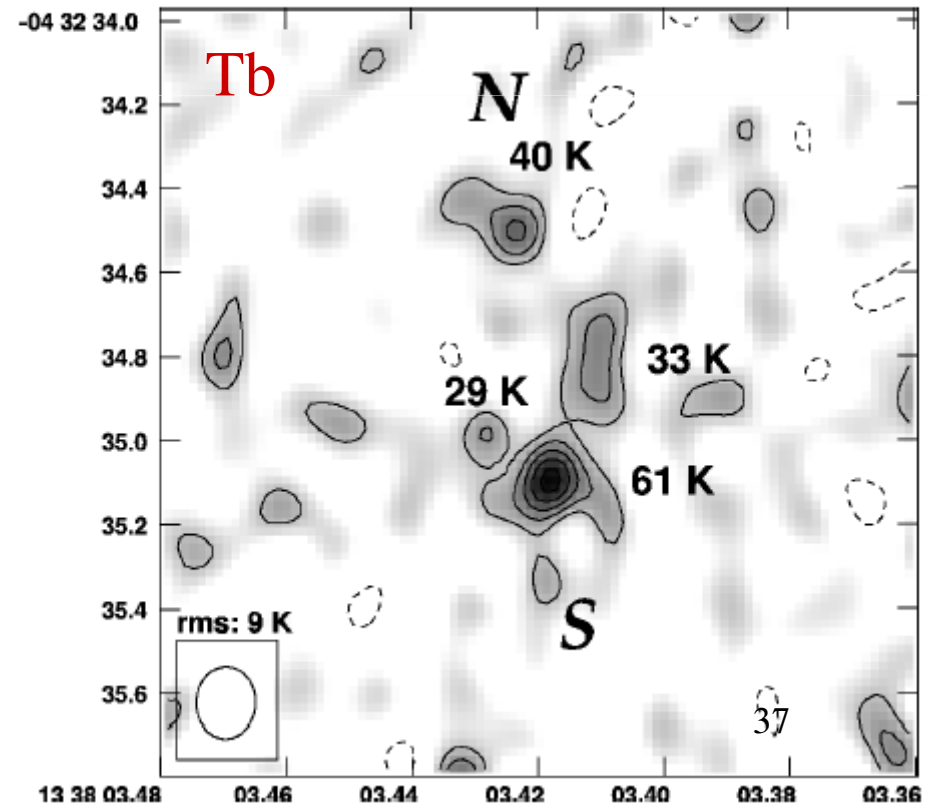
$$M_{H_2} = 9.2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{\text{dyn}} = 1.0 \cdot 10^{11} / \sin^2 i M_{\odot}$$

$$M_{\text{trou noir}} = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$$



VLA, CO(2-1)



Gaz Moléculaire dans un anneau d'Einstein

Galaxies en interactions?

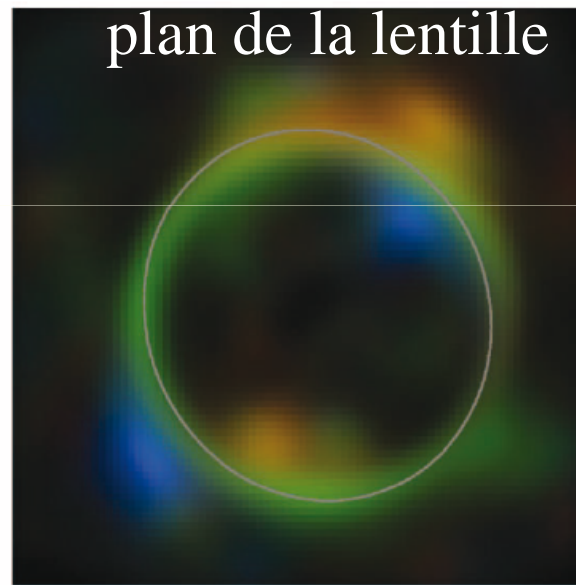
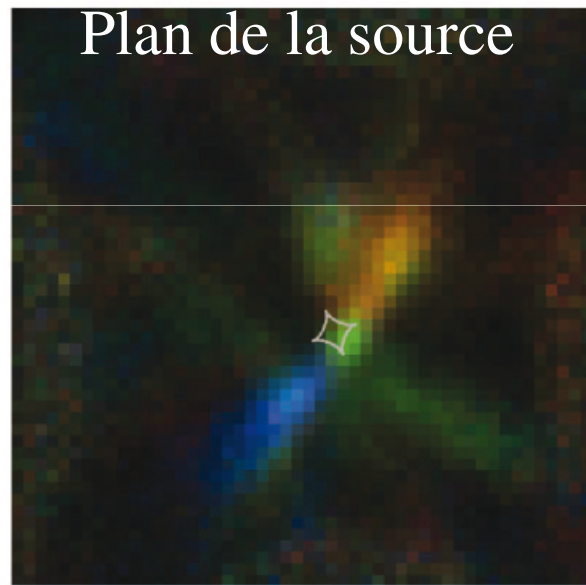
$z=4.12$

+ Trou noir

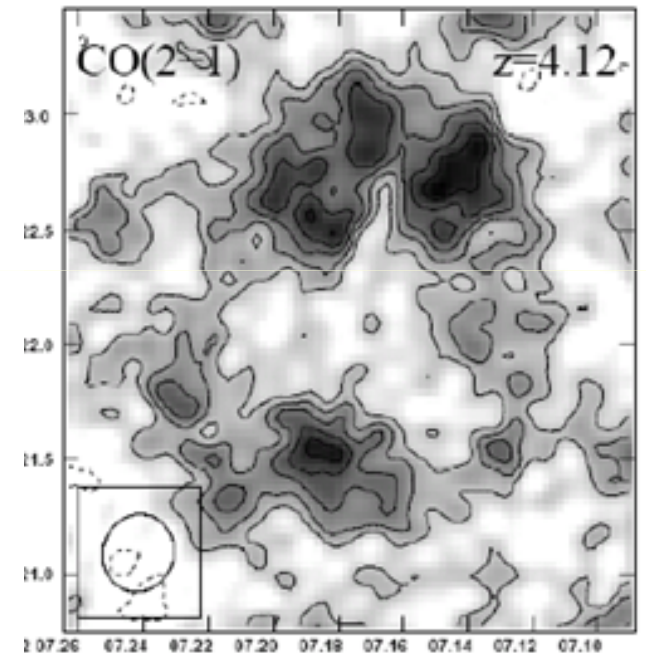
$$M_{H_2} = 1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

$$M_{\text{dyn}} = 4.4 \cdot 10^{10} / \sin^2 i M_{\odot}$$

$$M_{\text{trou noir}} = 1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$$



8.5 kpc



PSS J2322+1944 (Einstein Ring)

VLA, CO(2-1),
Formation d'étoiles 680 M_{\odot}/an

$M_{\text{bulbe}} = 30 M_{\text{trou noir}}$
Trou noir trop massif!

« Œil Cosmique »

$z=3.07$ interféromètre IRAM: CO(3-2)
 $M_{H2} = 2.4 \cdot 10^9 M_{\odot}$ $M^* = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$

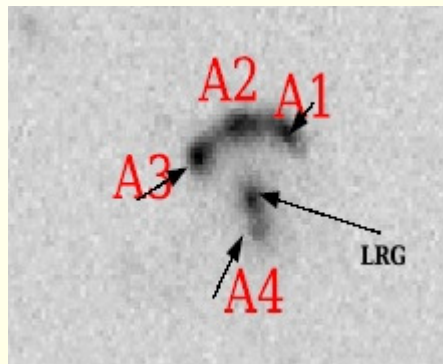
Formation d'étoiles modérée
60 M_{\odot}/yr durée de vie = 40 Myr

Détection possible grâce à
l'amplification d'un facteur **28**

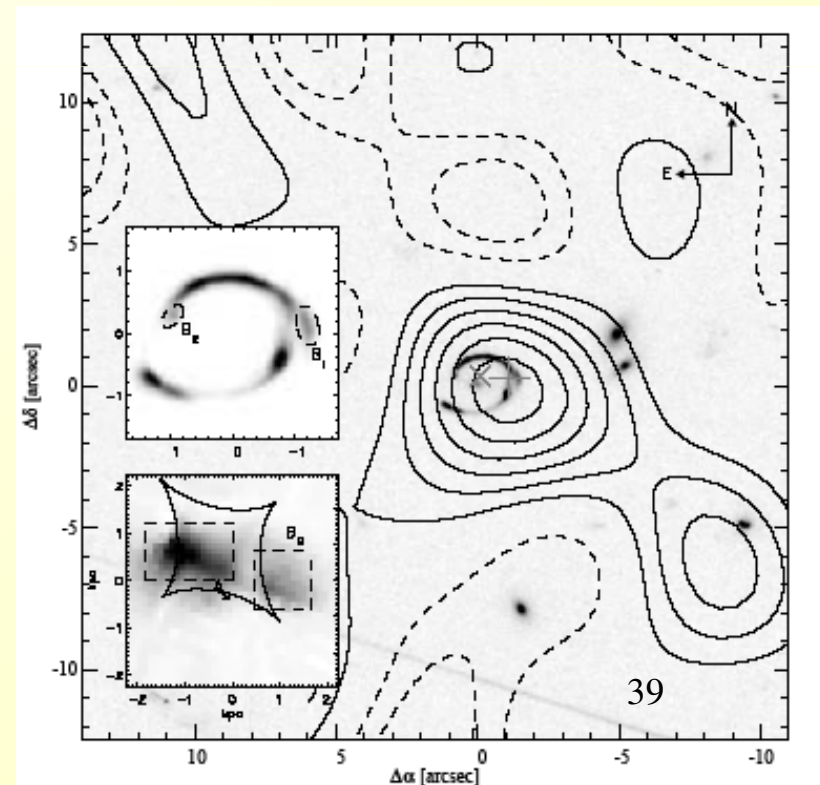
Masse dynamique $\sim 10^{10} M_{\odot}$



HST

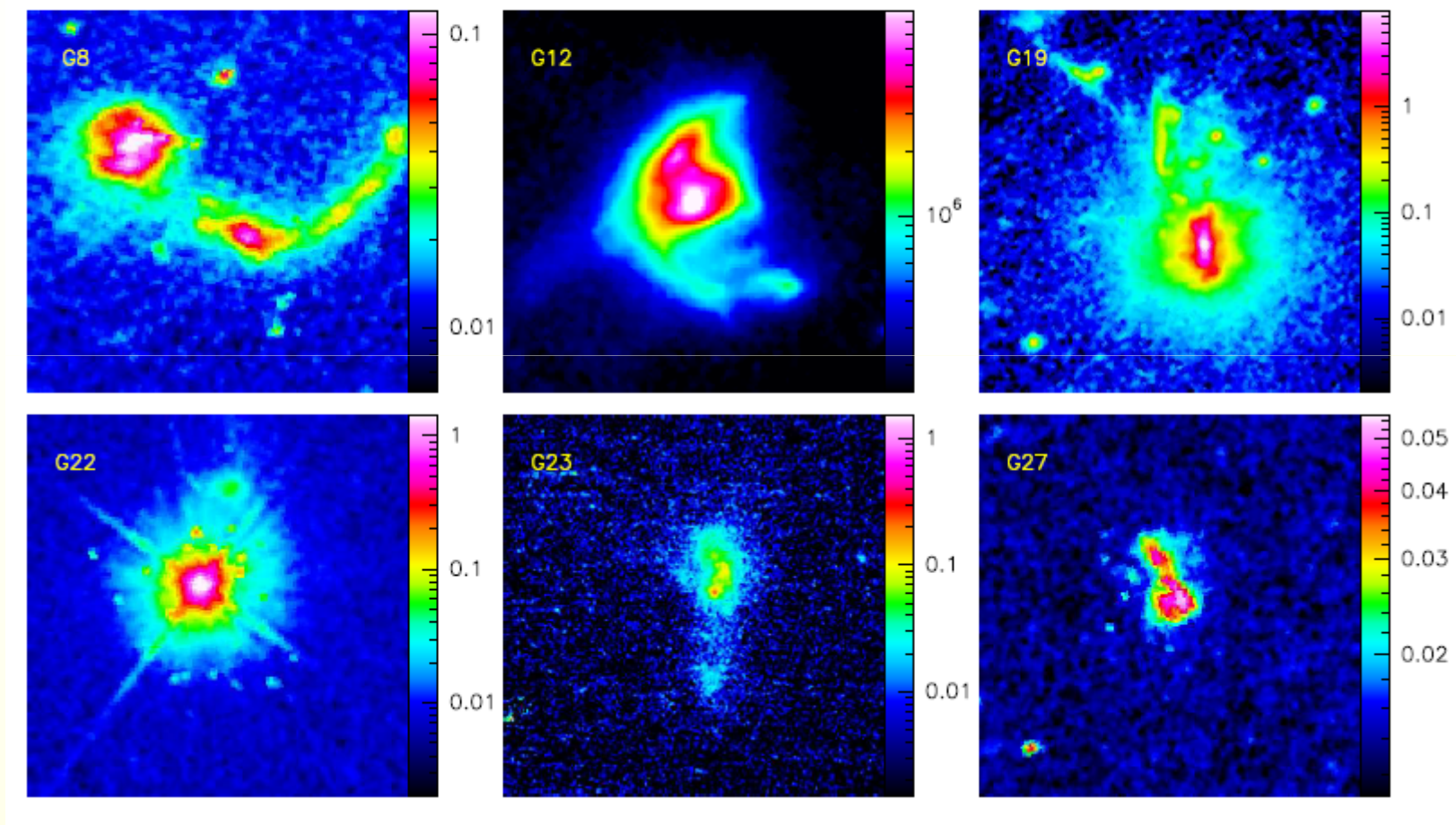


Arc de 8 heures



Galaxies ultra-lumineuses: Systèmes perturbés

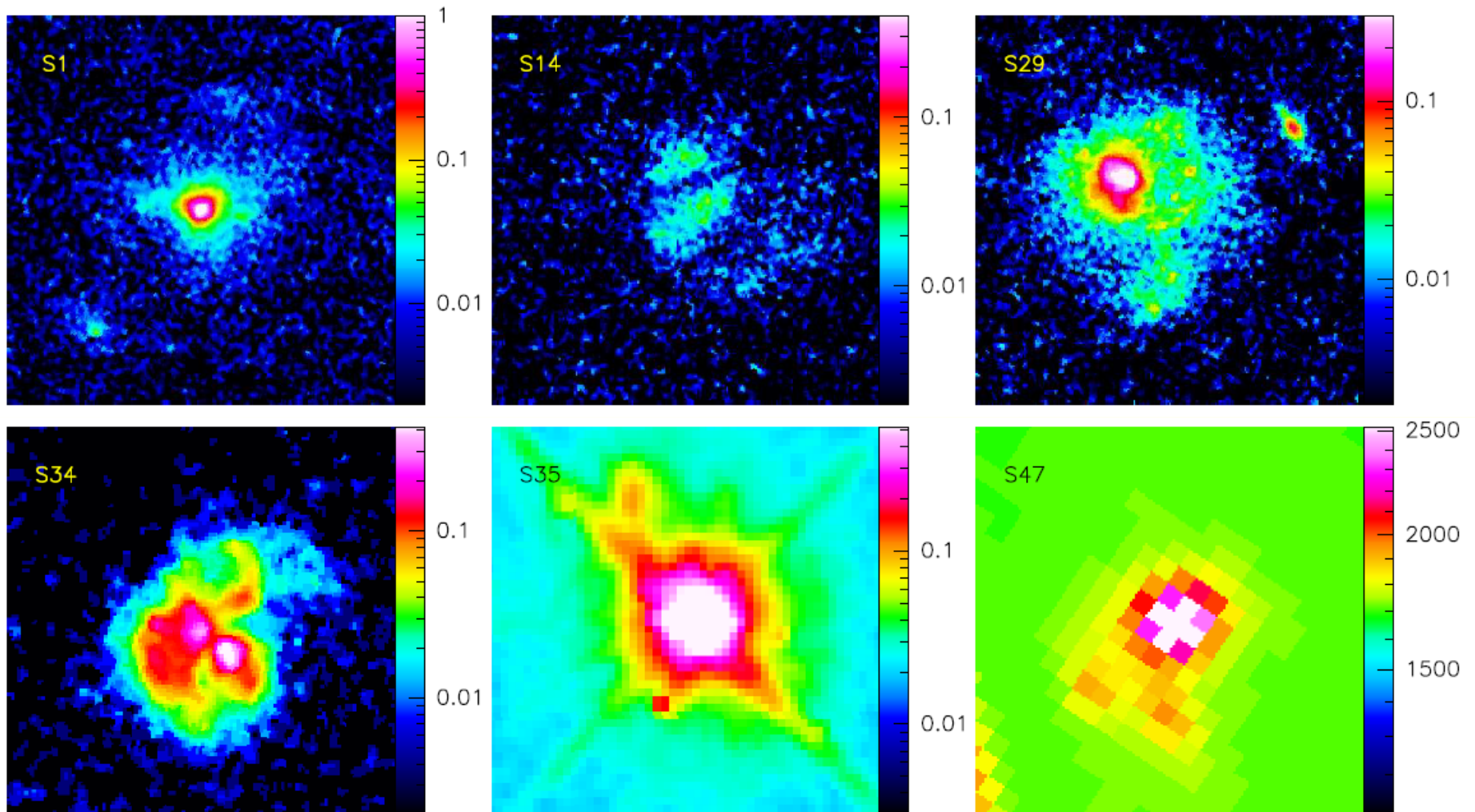
Toutes ces galaxies sont détectées en CO



10 arcsec

$0.2 < z < 0.6$

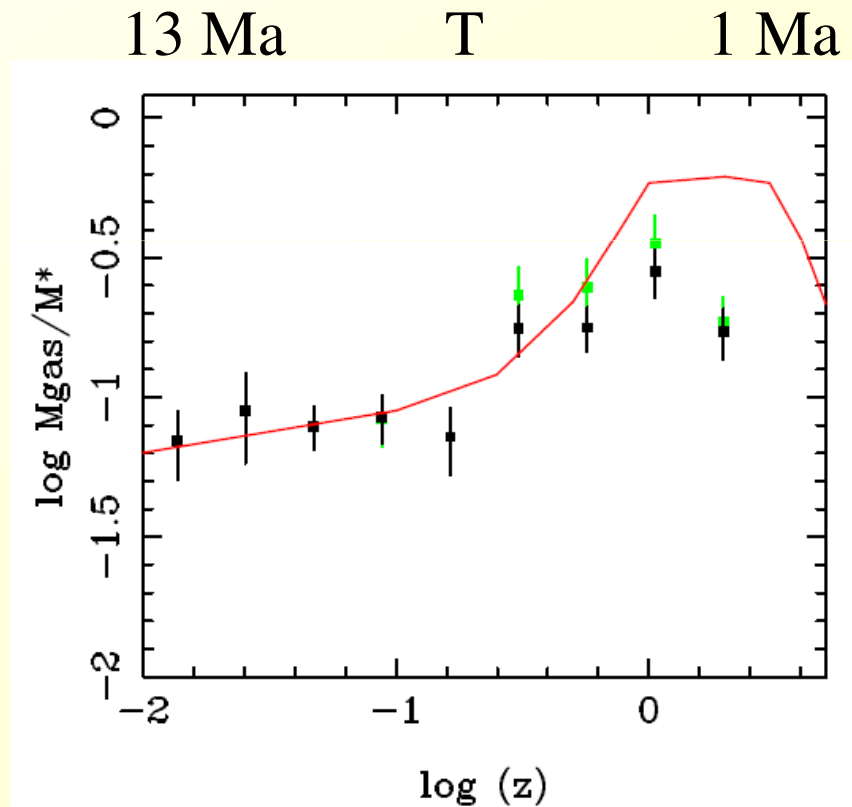
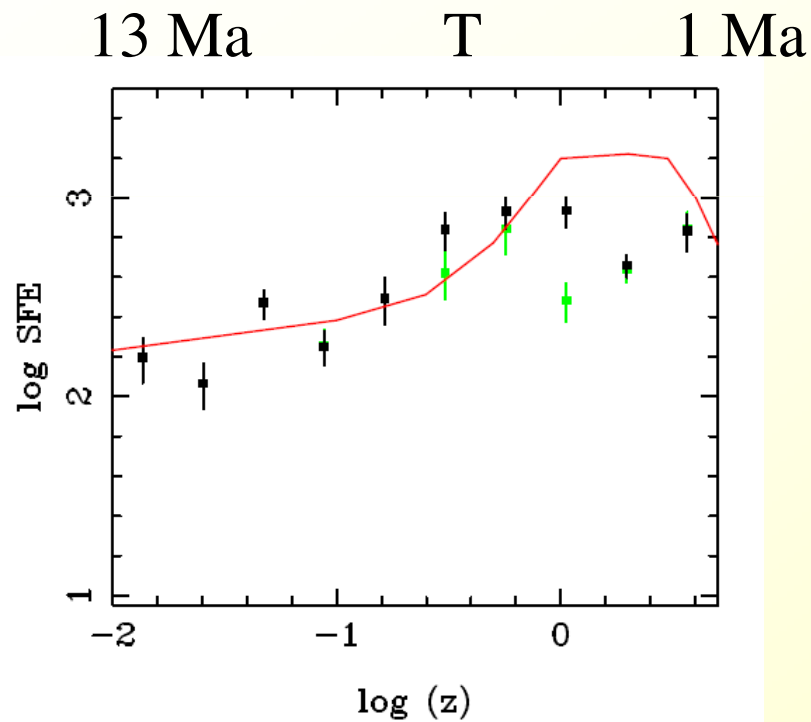
Détections dans la molécule CO



5 arcsec

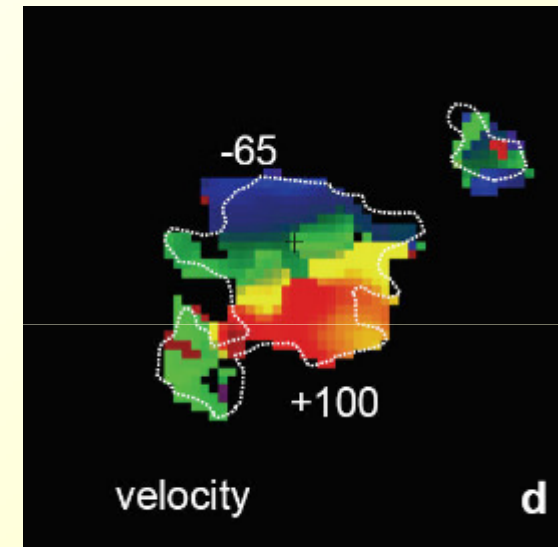
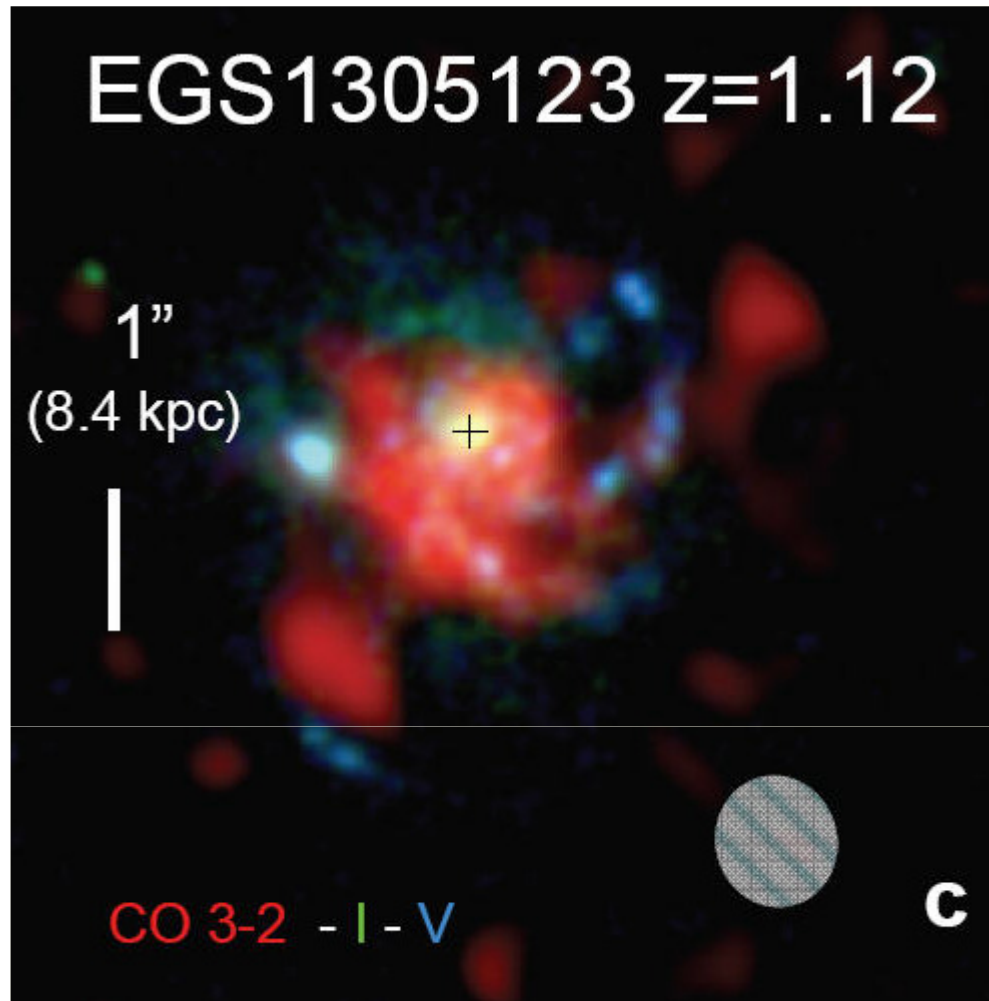
$0.6 < z < 1$

Efficacité de formation d'étoiles plus élevée, plus de gaz



Galaxies $z=1-2$

19 galaxies observées à IRAM,
10 à $z\sim 2.3$ et 9 à $z\sim 1.2$



Galaxies à formation d'étoiles « Normale »

Contenu en gaz **$\sim 34\%$ et 44% en moyenne** à $z=1.2$ et 2.3 respectivement
5% dans la Voie Lactée

Rose= gaz ionisé H α



Rouge: gaz moléculaire H $_2$

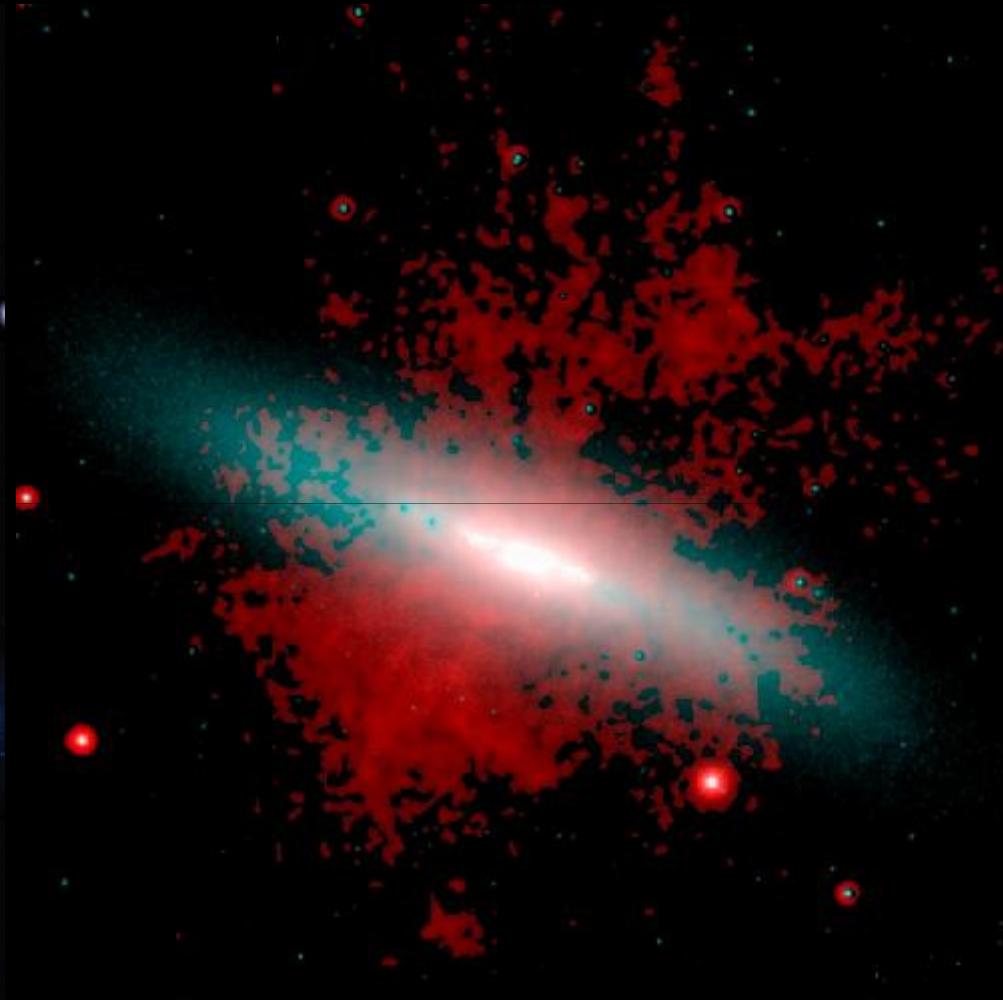
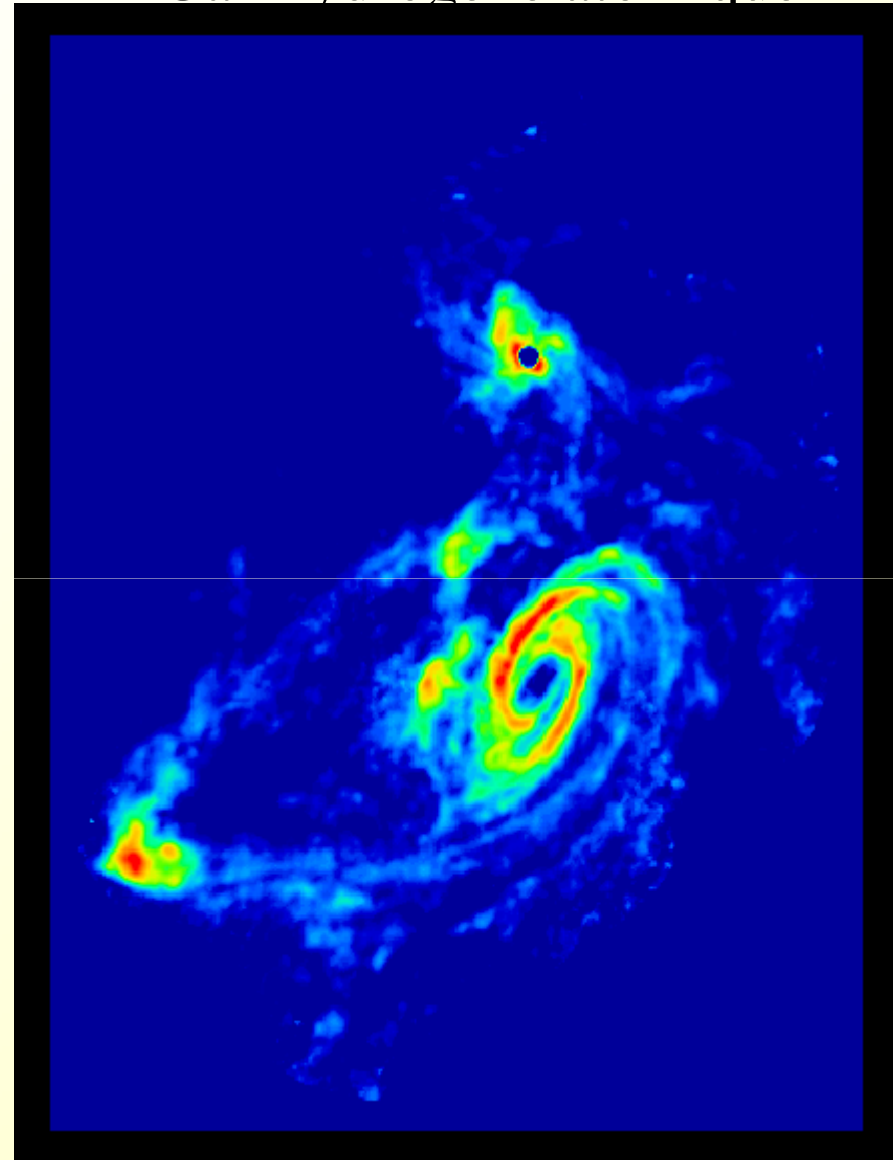


Image optique
Lumière des étoiles

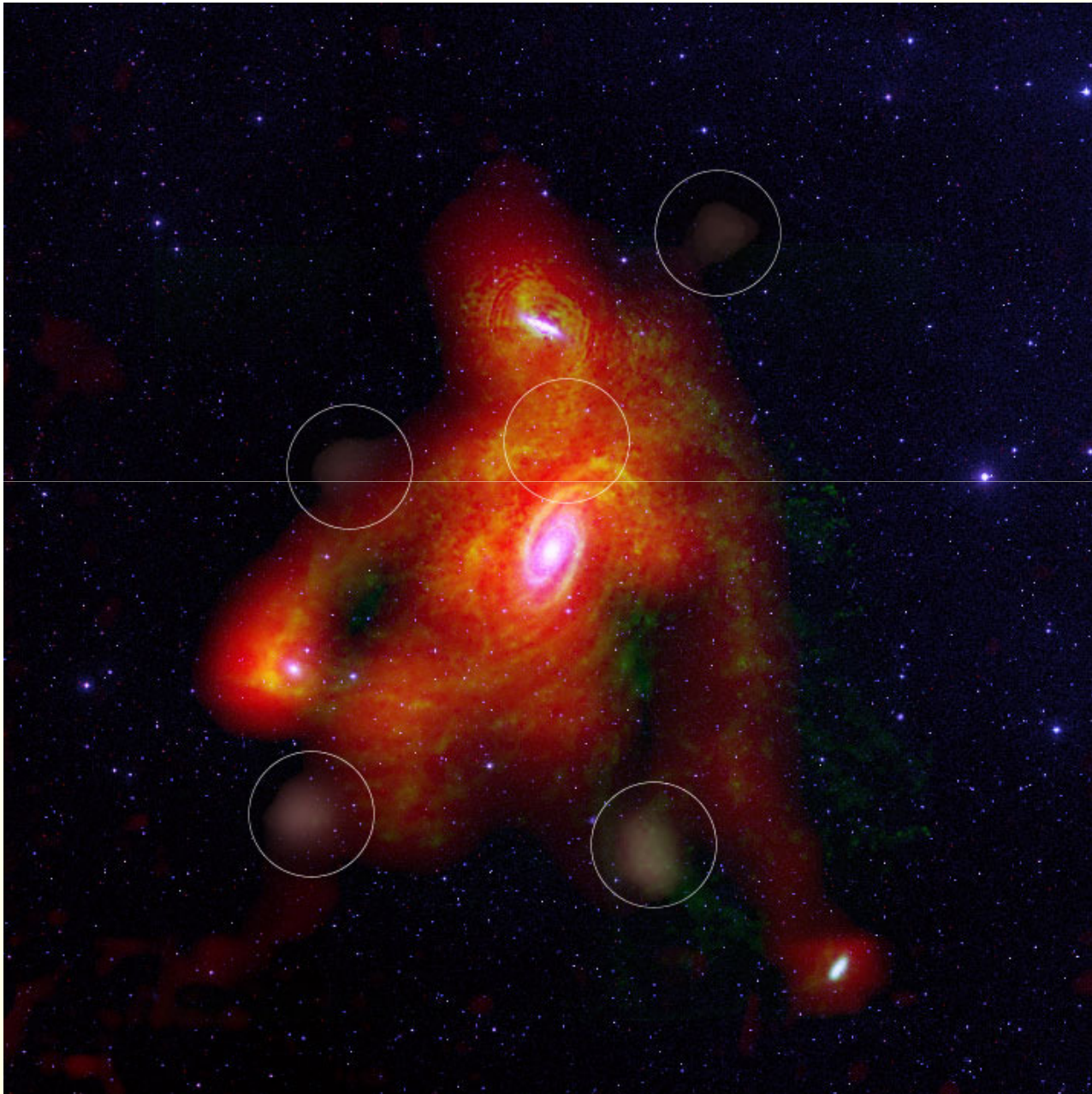


M81/M82/N3077

Gaz hydrogène atomique

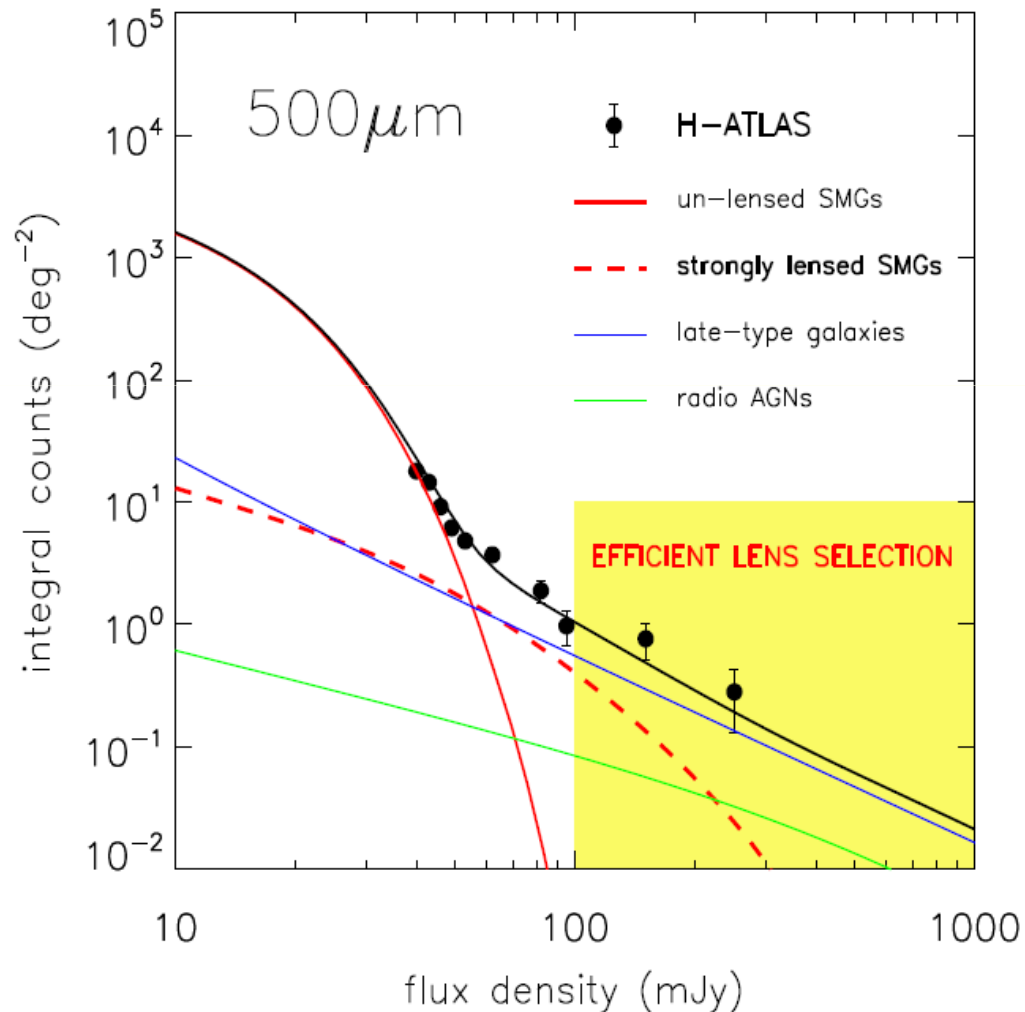


Nuages de gaz autour du système M81-M82





Galaxies de fond amplifiées détectées par Herschel



Au-dessus de 100 mJy, les sources
sont des galaxies + lentilles
6 sources détectées en 14 deg^2

Extrapolation > 100 galaxies
en 550 deg^2

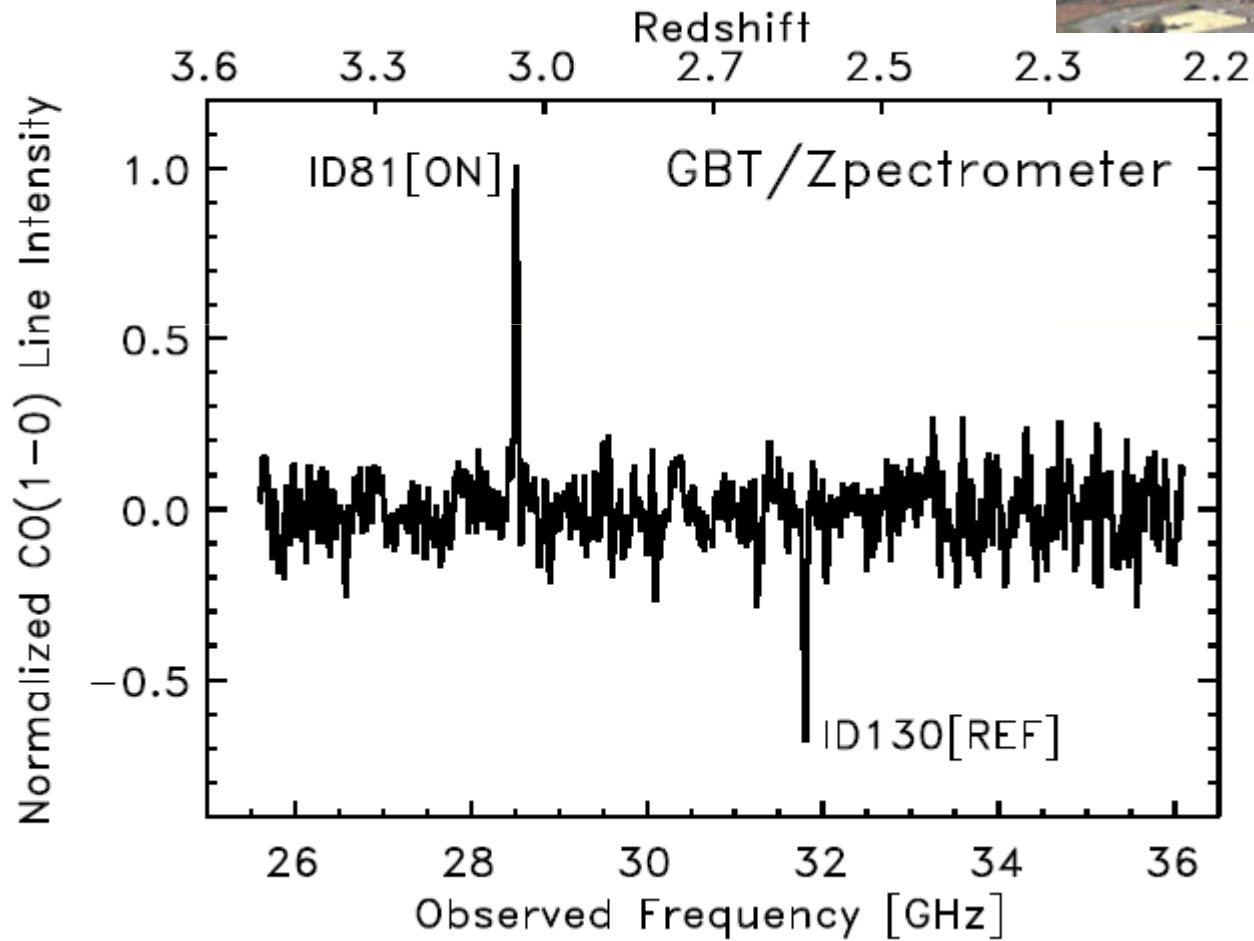
Observations en NIR
→ Révèle la lentille

Amas de galaxies comme télescope gravitationnel



Recherche du redshift avec les raies de CO

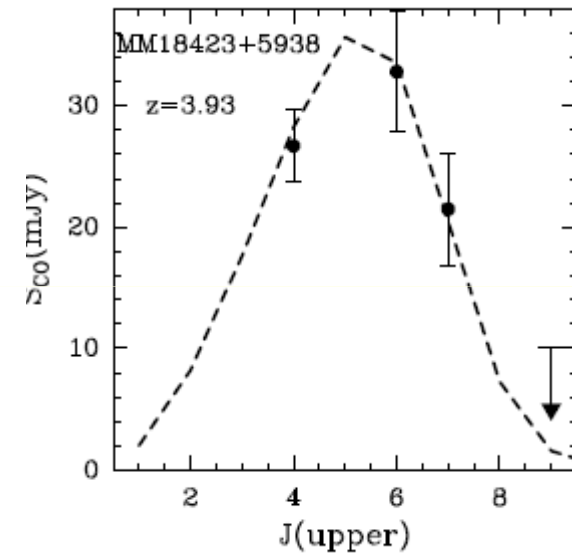
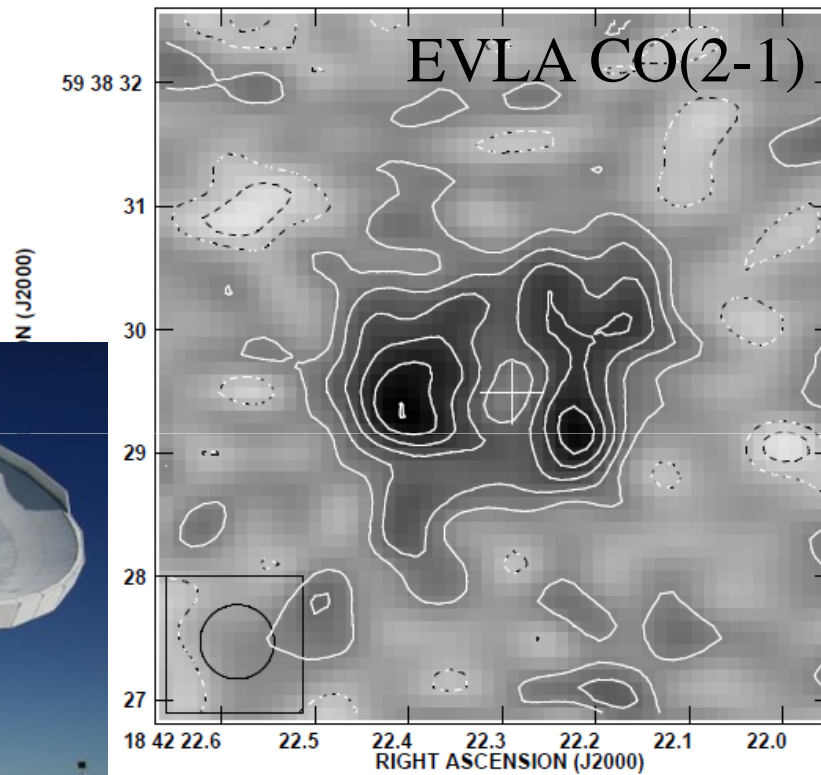
Recherche avec le GBT Z-spec
raie de CO(1-0)



Une galaxie ultra-lumineuse

Recherche de redshift avec IRAM-30m CO(6-5) et (4-3)

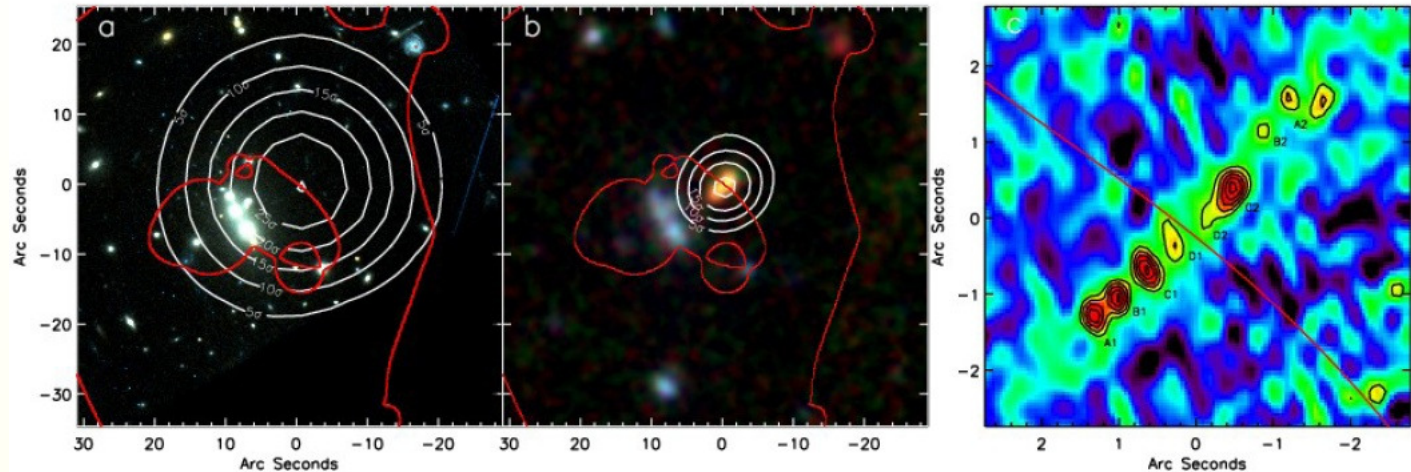
amplification
 $m=12$



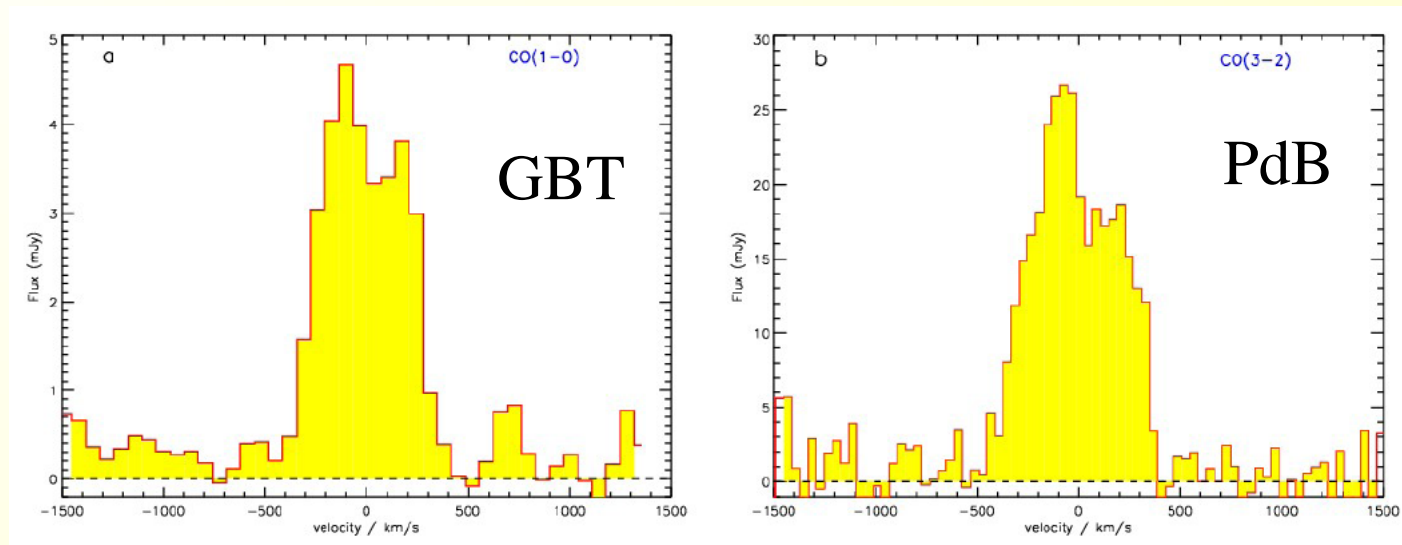
$S=30\text{mJy}$ à 1.2mm avec MAMBO. Recherche près d'un disque de débris
→ Découverte par hasard!

Formation d'étoiles: galaxie à $z=2.33$

$z=2.326$
Courbes
critiques

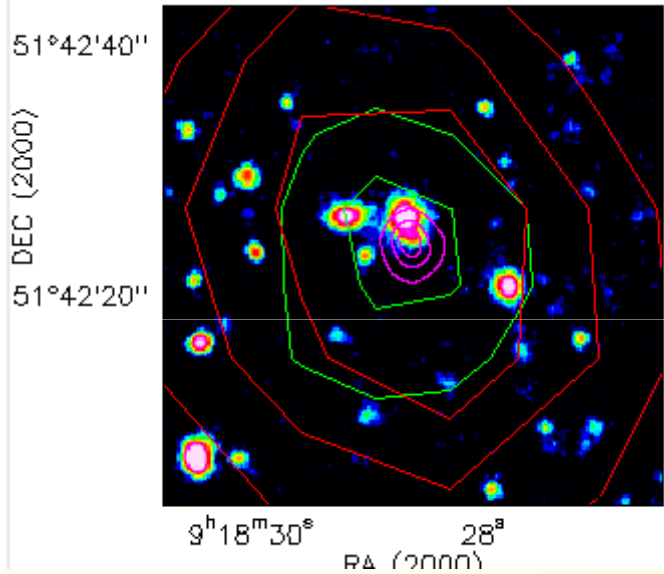


APEX 850μ sur image HST, 350μ sur IRAC SMA

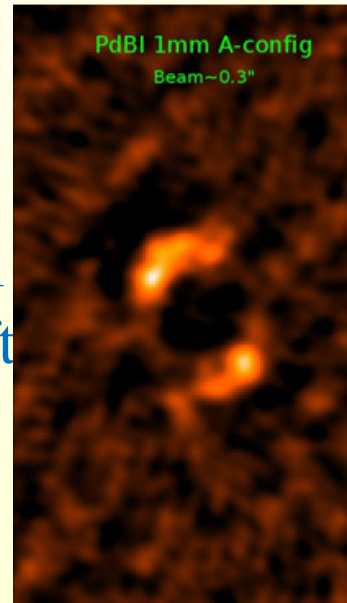


Une galaxie hyper-lumineuse, 1 Ma après le Big-Bang

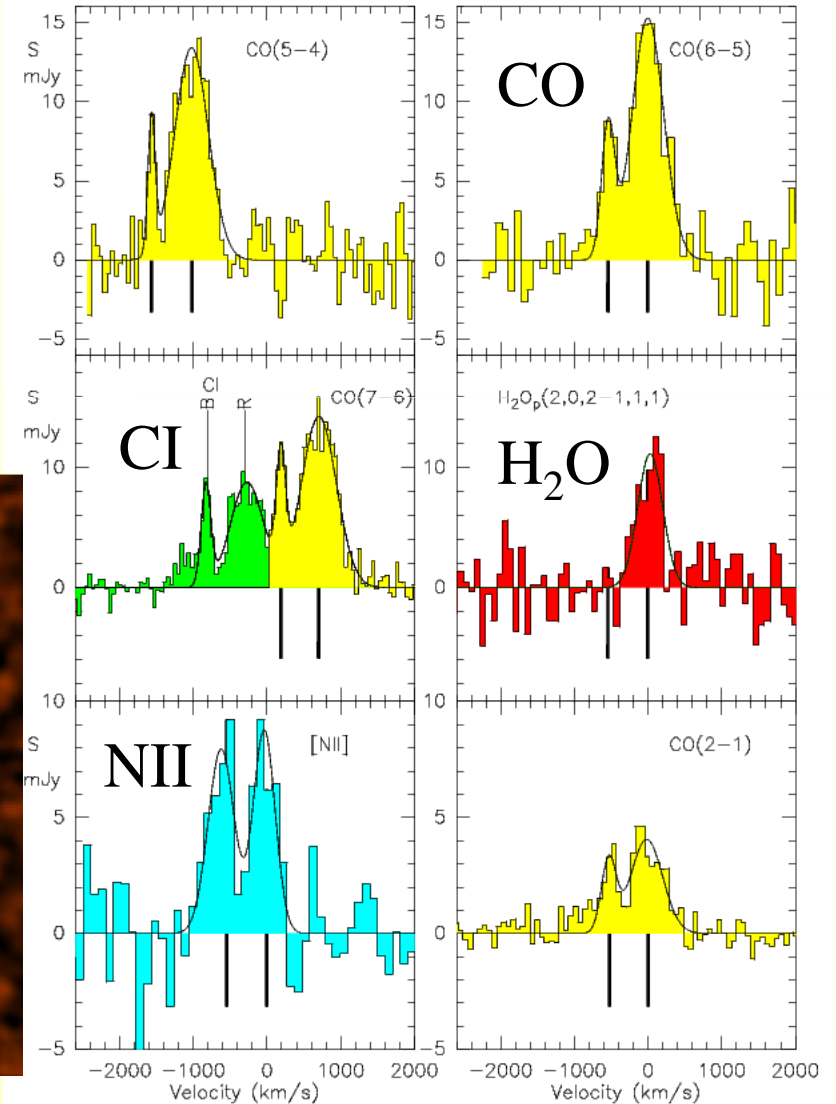
Image Subaru, spectre lentille Keck



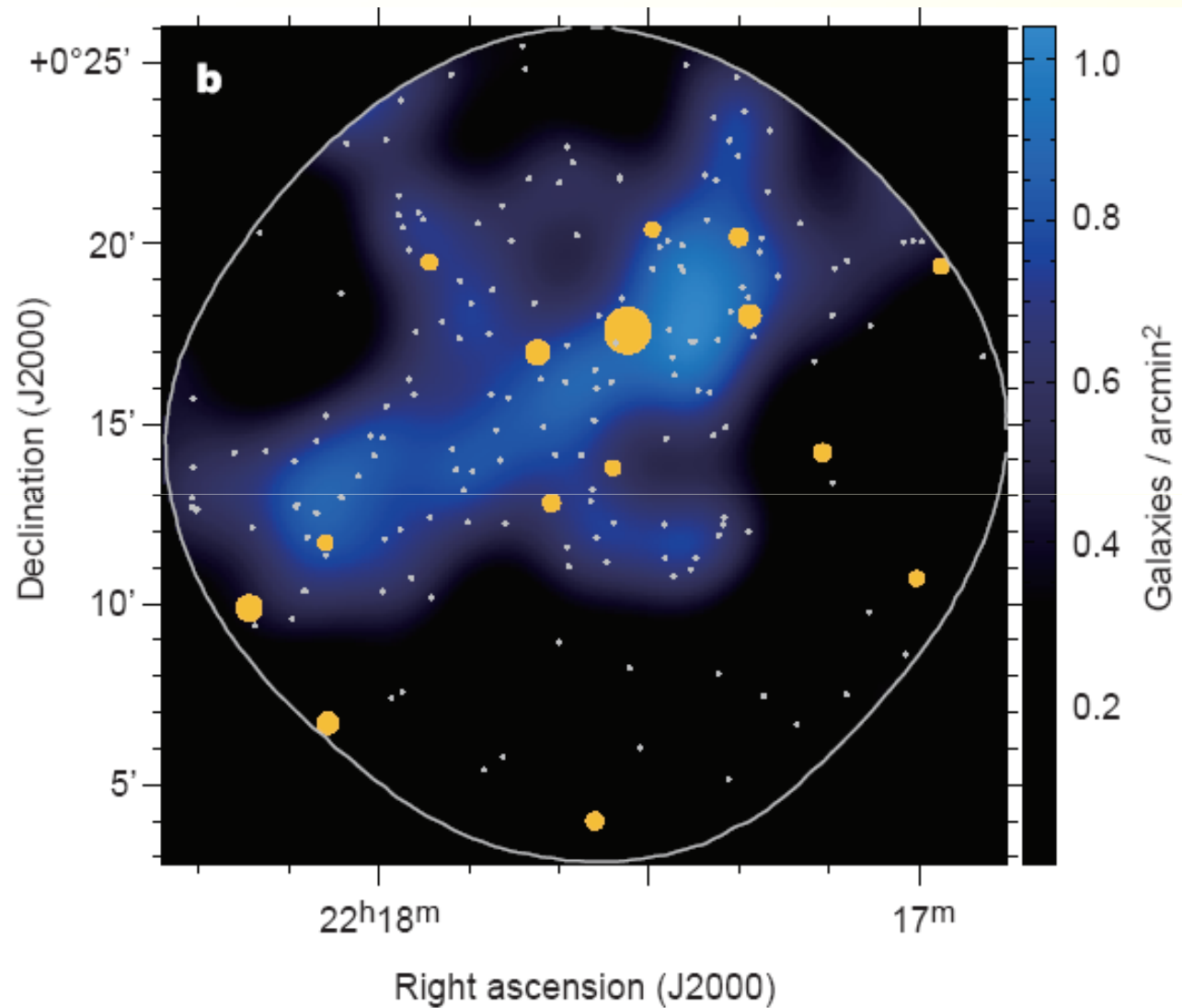
$Z=5.24$



Source détectée par Herschel en infrarouge, puis le redshift déterminé avec un scan de l'IRAM 30m



Starbusts dans les filaments d'objets Lyman- α

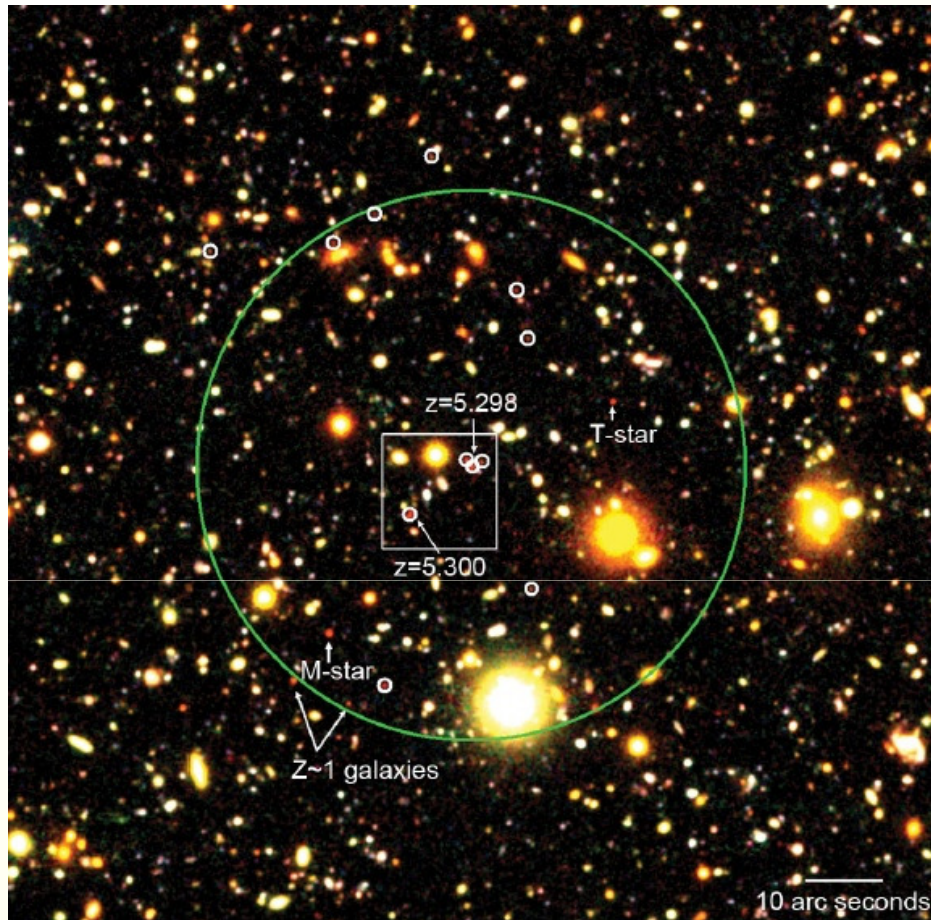


SSA22
Proto-amas de
galaxies
 $z=3.1$

Filament observé
par des galaxies
bleues

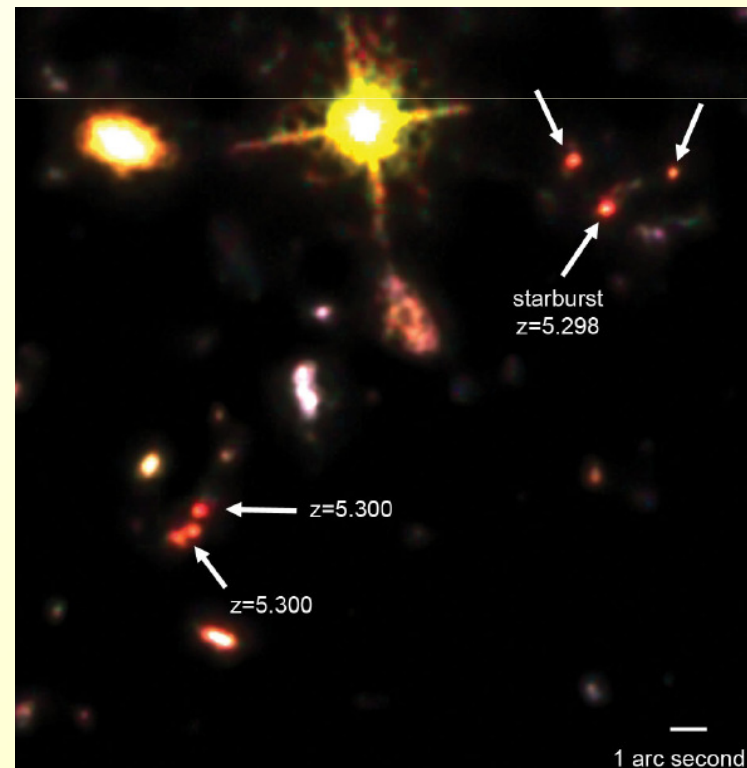
Points jaunes=
Flambées de
formation
d'étoiles

Un proto-amas massif à $z=5.3$



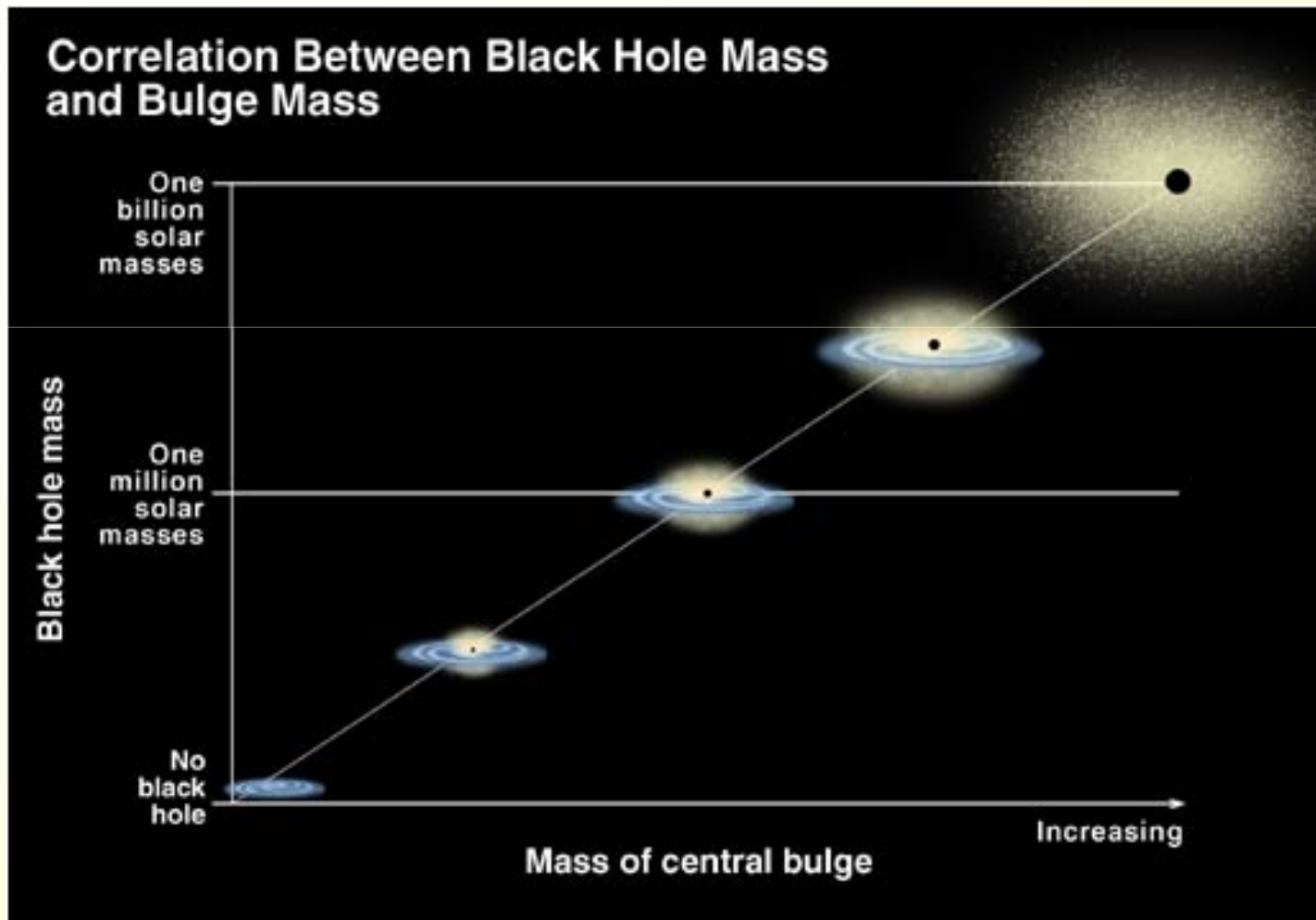
$M_{H2} = 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
70% gas, cD?

- 13 Mpc
- Inclut un quasar
- SMG COSMOS
- Aztec-3
- Total $> 4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

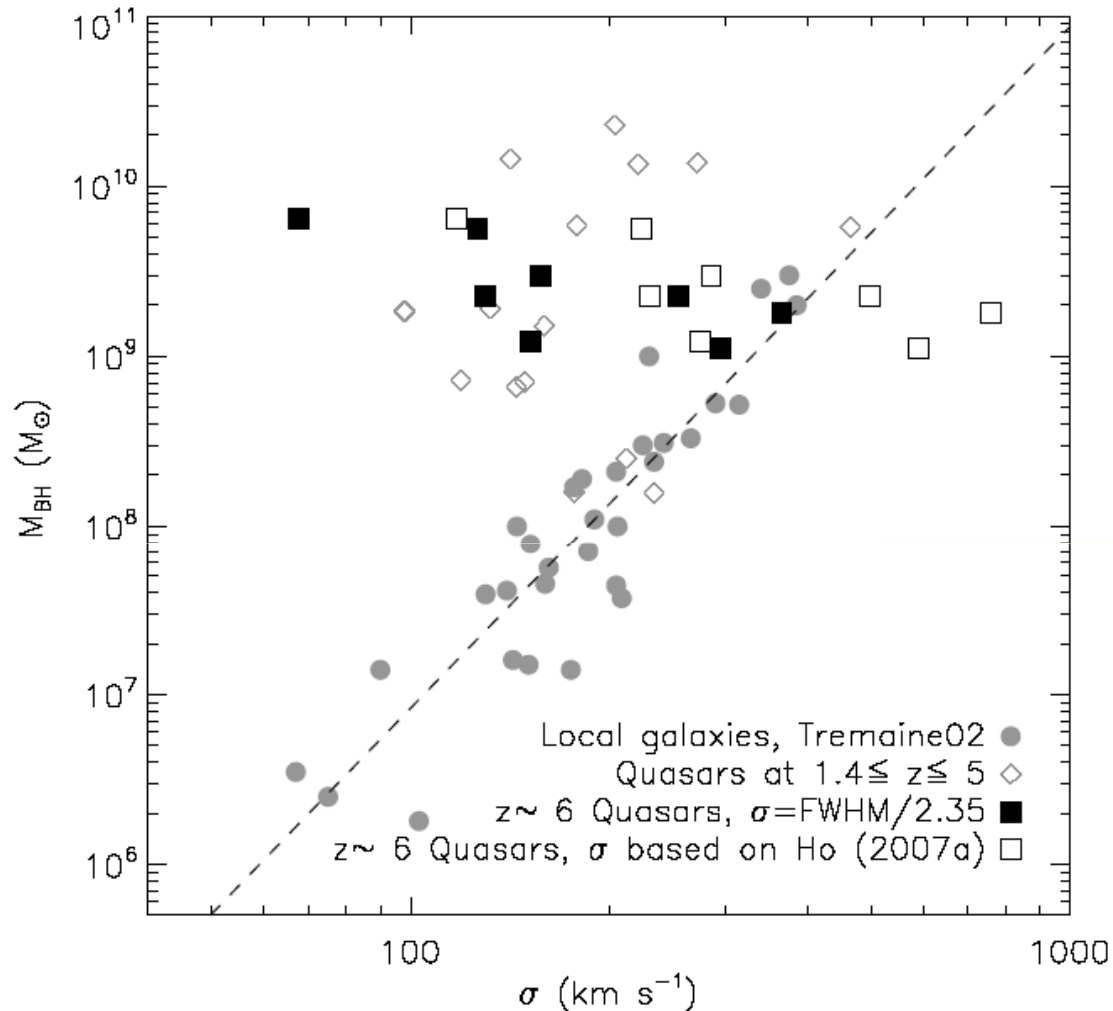


Co-habitation trou noir - Galaxie

Qu'en est-il au début de l'Univers?



$M_{\text{trou noir}}$ – Masse bulbe (ou σ)



Trous noirs précoces?

QSO à $z=6$

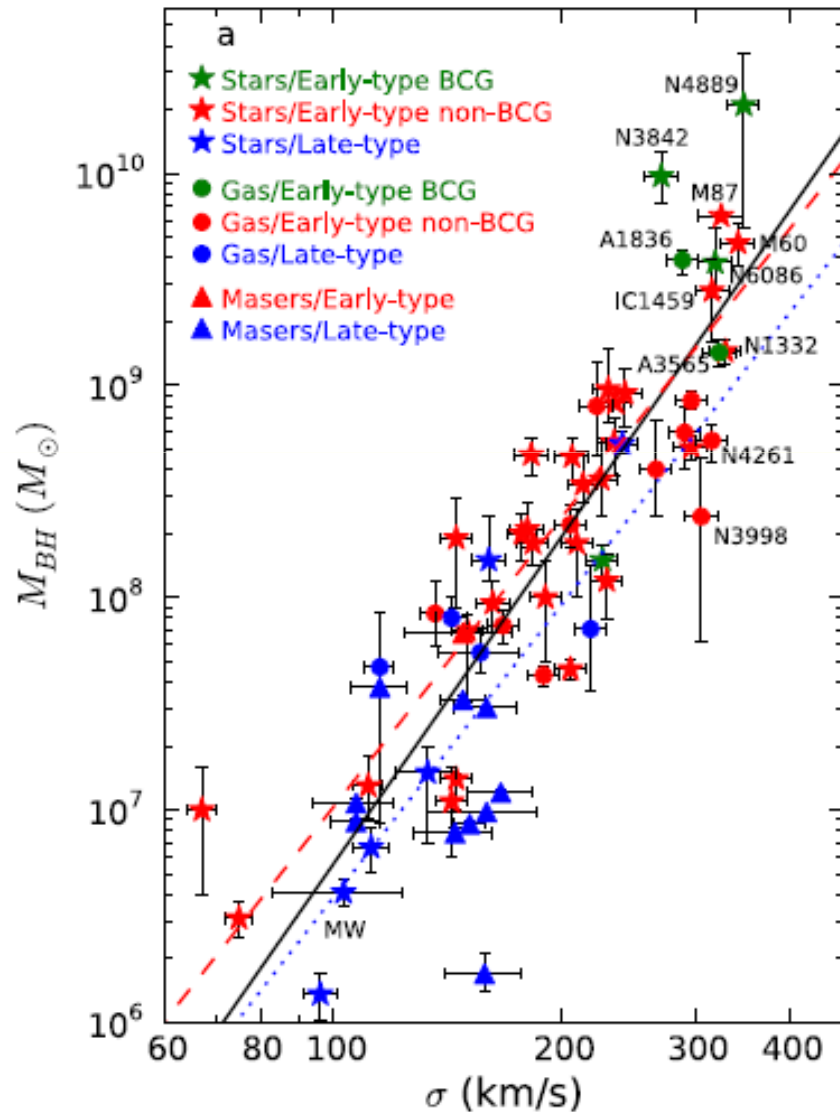
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

Mais:

Inclinaison incertaine

→ ALMA pourra donner la morphologie, et les inclinaisons

Masse du trou noir et masse du bulbe



Les deux masses sont proportionnelles $\sim 1/700$

Parfois, on arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

Avalent le gaz chaud avant la formation d'étoiles?

Perspectives avec ALMA, JWST, hypertélescopes..

JWST = Morphologie détaillée des étoiles

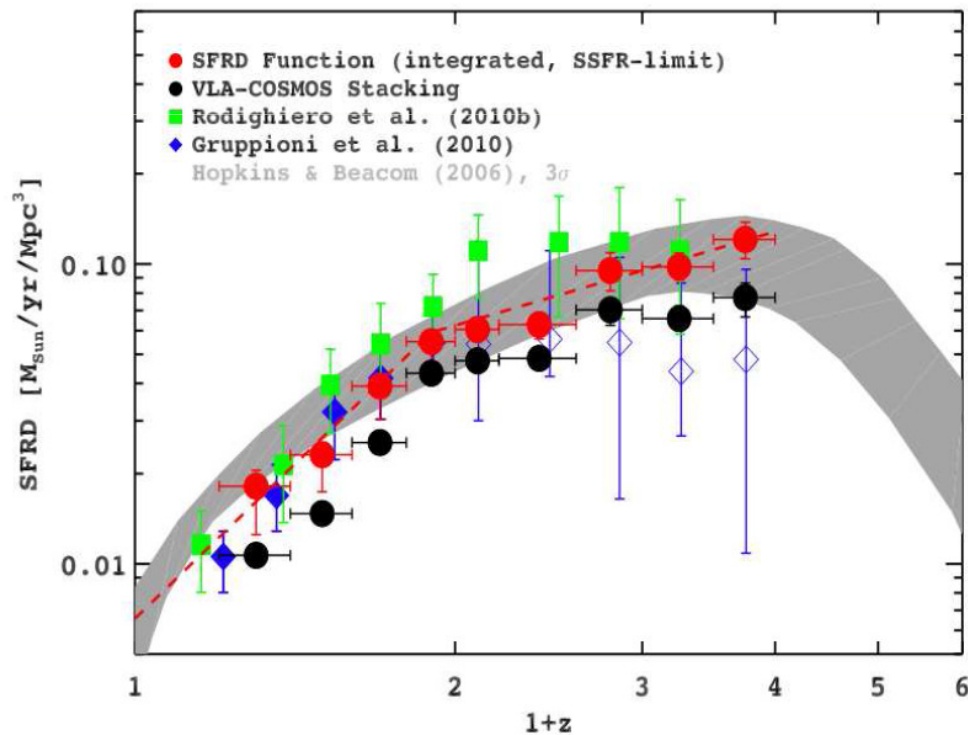
ALMA= Le gaz moléculaire

→ **efficacité** de formation des premières étoiles

13.7Ma

T

1 Ma



Histoire cosmique
de la formation stellaire